

Aproximación al entendimiento de la interacción río-  
acuífero, a partir de la implementación del método de  
Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE), en el sector del  
río Tonusco, municipio de Santa Fe de Antioquia

Gregorio Cárdenas Forero



Departamento de Ciencias de la Tierra

Universidad EAFIT

Medellín

Junio de 2019

Aproximación al entendimiento de la interacción río-  
acuífero, a partir de la implementación del método de  
Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE), en el sector del  
río Tonusco, municipio de Santa Fe de Antioquia

Gregorio Cárdenas Forero

Proyecto de grado como requisito para optar por el título de Geólogo

Asesora:

Marcela Jaramillo Uribe (Ph.D)



Departamento de Ciencias de la Tierra

Universidad EAFIT

Medellín

Junio de 2019

## **Dedicatoria**

En el presente trabajo rindo tributo a mis padres, por ser los motivadores para la realización de este trabajo y mis sueños, y por los principios y valores que me inculcaron desde temprana edad.

El presente trabajo también está dedicado a todas las personas que participaron y colaboraron en la realización y culminación de este proyecto de grado.

## **Agradecimientos**

Agradezco con todo cariño a la profesora Marcela Jaramillo Uribe (asesora de mi proyecto de grado) por haberme compartido todo su conocimiento, tiempo y paciencia para la realización de este proyecto.

A mis padres y mi hermano Camilo, por darme la motivación para seguir adelante con este proceso.

Agradecimientos al ingeniero físico Juan Felipe Paschke por su disposición y voluntad de guiarme en este proyecto.

A los jurados, Isabel Restrepo y Camilo Florez por compartir de su tiempo para hacer de este proyecto algo mejor.

Finalmente, pero no menos importante, agradezco de todo corazón a mis amigos Giorgio, Negro, Emanuel, Yeiner, Angélica, Cristián y demás (si los menciono a todos no alcanzaría a entregar este documento) por disponer del tiempo y la actitud para ayudarme con las diferentes actividades al respecto.

## Tabla de contenido

1. Introducción .....	9
2. Generalidades .....	15
2.1. Objetivo general: .....	15
2.2. Objetivos específicos: .....	15
2.3. Pregunta de investigación.....	15
2.4. Hipótesis .....	16
3. Metodología .....	17
3.1. Etapa de consulta .....	17
3.2. Etapa de precampo .....	18
3.3. Etapa de campo .....	19
3.4. Etapa de postcampo .....	20
4. Área de estudio .....	22
4.1. Localización .....	22
4.2. Geología.....	25
4.3. Geomorfología .....	27
5. Prospección geofísica .....	30
5.1. Adquisición de datos .....	30
5.2. Procesamiento de las TRE.....	32
5.3. Ajuste de rangos de resistividad para despliegue de resultados .....	39
6. Resultados y análisis .....	46
6.1. TRE 2-2B .....	48
6.2. TRE 3-3B .....	51
6.3. TRE 5-5B .....	53
6.4. TRE 6-6B .....	56
6.5. Medición del nivel piezométrico .....	59
7. Discusión .....	66
8. Conclusiones .....	74
9. Recomendaciones .....	76
10. Bibliografía .....	77
11. Anexos .....	80

## Lista de figuras

<b>Figura 1.</b> Esquema generalizado de los procesos de interacción entre el agua subterránea y el agua superficial (interacción río-acuífero). Modificado de Winter et al., (1998). a) corriente ganadora. b) corriente perdedora. ....	10
<b>Figura 2.</b> Sistema Acuífero Santa Fe de Antioquia con sus sectores geológicos. Tomado de Corantioquia-UNAL (2004).....	13
<b>Figura 3.</b> Flujograma del proceso metodológico. Creación propia.....	17
<b>Figura 4.</b> Localización de área de estudio. Creación propia. El recuadro magenta muestra el área de estudio, que hace parte de la plancha 130IIB3 que está representada por el recuadro negro. ....	22
<b>Figura 5.</b> Mapa de cuenca del río Tonusco. Modificado de Corantioquia-SHI (2017). ....	24
<b>Figura 6.</b> Mapa geológico del área de estudio. Creación propia.....	26
<b>Figura 7.</b> Mapa geomorfológico del área de estudio. Creación propia. ....	29
<b>Figura 8.</b> Localización de Tomografías de Resistividad Eléctrica (TRE). Elaboración propia. En el presente mapa se destacan las TRE realizadas en la campaña de campo del 23 de febrero del 2019 (triángulo negro), las TRE de la campaña de Campo 2 del día 12 de octubre de 2017 (punto verde) y los puntos de agua (punto azul), que corresponden a pozos y aljibes cartografiados en la zona, algunos de estos aljibes fueron identificados (puntos rojos) y se les midió el nivel piezométrico....	30
<b>Figura 9.</b> Tomografía de resistividad eléctrica (TRE). a) pseudosección aparente, b) pseudosección teórica, c) modelo de inversión final con la resistividad real (perfil geoelectrico), los costados sombreados corresponden a datos extrapolados debido al uso del modelo extendido (ver parámetros y modelamientos matemáticos). Ejemplo correspondiente al procesamiento de la TRE 4. ....	32
<b>Figura 10.</b> Anlisis de ruido a partir de la función <i>exterminate bad data point</i> . Ejemplo correspondiente al procesamiento de la TRE 2.....	33
<b>Figura 11.</b> Modelo de sensibilidad de bloques. Ejemplo correspondiente al procesamiento de la TRE 2. Notar que a medida que la profundidad aumenta los valores de sensibilidad (Relative sensitivity values) disminuyen, lo que indica una baja precisión de datos en ese punto (bloques azules). ....	36
<b>Figura 12.</b> Modelo de sensibilidad del subsuelo. Ejemplo correspondiente al procesamiento de la TRE 2. Notar que los menores valores de sensibilidad (bloques azules) se encuentran a los costados inferiores del modelo, esto debido a la extrapolación de los datos que genera el uso del modelo extendido. ....	37
<b>Figura 13.</b> Flujograma del procesamiento de las TRE. Creación propia.....	38
<b>Figura 14.</b> Relación entre las variables obtenidas durante la etapa de adquisición. <b>a)</b> tabla con las variables obtenidas de la adquisición de las TRE, las cuales corresponden a: número de datos (num), corriente (I), voltaje (U) y resistividad (rho). <b>b)</b> tabla que muestra la relación que hay entre cada una de las variables seleccionadas (en este caso, U, I y Resistividad). ....	40
<b>Figura 15.</b> Proceso para la realización de histograma de rangos y frecuencias. <b>a)</b> Tabla de relación entre el número de datos (num) y la resistividad (rho), <b>b)</b> estadística descriptiva de los datos de rho y <b>c)</b> variables de número de datos para los rangos de colores de resistividad (No), rangos de resistividad, litología y la razón, la última corresponde a la variable definida para hacer coincidir el valor del último rango (No. 16, en la tabla <b>c)</b> con el valor máximo obtenido en la estadística (654,318, en la tabla <b>b)</b> ). Notar que el valor mínimo y la razón, en las tablas b y c respectivamente, tiene una descripción en rojo que dice “ingreso en el RES”, pues dichos valores son los que se introducen en el software RES2DINV para así establecer el intervalo de contornos para estandarizar los colores en el modelo de inversión final. ....	40

<b>Figura 16.</b> Histograma con los rangos y las frecuencias de las resistividades. Realizado como un paso para establecer la frecuencia con la cual los rangos de resistividad se presentan. ....	41
<b>Figura 17.</b> Tabla de composición RGB (izquierda) y tabla de colores asignados a las litologías observadas en campo (derecha). Notar que los colores más fríos (como azules y verdes) corresponden a resistividades bajas y litologías finas con alto nivel de saturación, mientras que los colores más cálidos (desde amarillo hasta morado) corresponden a resistividades más altas y litologías gruesas con bajo nivel de saturación. ....	42
<b>Figura 18.</b> Flujograma del procesamiento para estandarizar los colores en el RES2DINV. Creación propia. ....	43
<b>Figura 19.</b> Modelos de inversión de TRE 2 (arriba) y 2B (abajo) antes del proceso de Ajsute de rangos de resistividad para despliegue de resultados. ....	44
<b>Figura 20.</b> Modelos de inversión de TRE 2 (arriba) y 2B (abajo) después del proceso de Ajsute de rangos de resistividad para despliegue de resultados. ....	44
<b>Figura 21.</b> Gradación intercalada de arenas conglomeráticas y gravas saturadas. Columna 2. Fuente propia. ....	48
<b>Figura 22.</b> Modelo de inversión final de la TRE 2 (paralela al cauce del río) con sus respectivos sectores. Orientación del perfil geoelectrico (Azimuth): 328°. ....	50
<b>Figura 23.</b> Modelo de inversión final de la TRE 2B (perpendicular al cauce del río, sobre la margen derecha) con sus respectivos sectores. Notar los cambios en la saturación de los materiales (sector B y A) debido al contacto directo que hay entre la terraza y las aguas del río. Orientación del perfil geoelectrico (Azimuth): 079°. ....	50
<b>Figura 24.</b> Gradación caótica de gravas con matriz arenosa saturada. En la parte inferior del afloramiento se puede observar el contacto directo que hay entre la terraza con la llanura de inundación que se encuentra altamente saturada. Columna 3-3B. Fuente propia. ....	51
<b>Figura 25.</b> Modelo de inversión final de la TRE 3 (paralela al cauce del río) con sus respectivos sectores. Orientación del perfil geoelectrico (Azimuth): 330°. ....	52
<b>Figura 26.</b> Modelo de inversión final de la TRE 3B (perpendicular al cauce del río) con sus respectivos sectores. Orientación del perfil geoelectrico (Azimuth): 079°. ....	53
<b>Figura 27.</b> Evidencia de suelo saturado y de superficie donde se realizó la TRE 5-5B. Columna 5-5B. Fuente propia. ....	53
<b>Figura 28.</b> Modelo de inversión final de la TRE 5 (paralela al cauce del río) con sus respectivos sectores. Orientación del perfil geoelectrico (Azimuth): 322°. ....	54
<b>Figura 29.</b> Modelo de inversión final de la TRE 5B (perpendicular al cauce del río, sobre la margen izquierda) con sus respectivos sectores. Orientación del perfil geoelectrico (Azimuth): 048°. ....	55
<b>Figura 30.</b> Gradación caótica de gravas y arenas saturadas. Columna 6. Fuente propia. ....	56
<b>Figura 31.</b> Gradación granocreciente de base a techo entre gravas saturadas y arenas intercaladas con limos, determinada con ayuda de la geología levantada en campo y la interpretación geoelectrica. Imagen tomada y modificada de Amaya et al. (2017). ....	57
<b>Figura 32.</b> Modelo de inversión final de la TRE 6 (paralela al cauce del río) con sus respectivos sectores. Orientación del perfil geoelectrico (Azimuth): 335°. ....	57
<b>Figura 33.</b> Modelo de inversión final de la TRE 6B (perpendicular al cauce del río) con sus respectivos sectores. Orientación del perfil geoelectrico (Azimuth): 249°. ....	58
<b>Figura 34.</b> Mapa de isopiezas para la zona de estudio a partir del método Spline. Creación propia. ....	61
<b>Figura 35.</b> Mapa de isopiezas para la zona de estudio a partir del método IDW. Creación propia. ....	61
<b>Figura 36.</b> Mapa de isopiezas para la zona de estudio a partir del método Kriging. Creación propia. ....	62

<b>Figura 37.</b> Perfil piezométrico para la margen derecha del río Tonusco. Creación propia. ....	64
<b>Figura 38.</b> Perfil piezométrico para la margen izquierda del río Tonusco. Creación propia. ....	64
<b>Figura 39.</b> Perfil geoelectrico de la TRE 5B. ....	69
<b>Figura 40.</b> Mapa de modelos de inversión final (perfiles geoelectricos) interpretados en las diferentes zonas enmarcadas dentro del área de interés. ....	71

## Lista de tablas

<b>Tabla 1.</b> Características de las unidades geológicas identificadas en el área de estudio. ....	25
<b>Tabla 2.</b> Características de las unidades geomorfológicas identificadas en el área de estudio. Creación propia. ....	27
<b>Tabla 3.</b> Características de las tomografías de resistividad eléctrica (TRE). ....	31
<b>Tabla 4.</b> Características de los aljibes medidos en el área de estudio. Sistema de coordenadas: Magna Colombia Oeste. ....	59
<b>Tabla 5.</b> Valores típicos de resistividad. Tomado de UNAL (2000). ....	68



## 1. Introducción

Las aguas subterráneas constituyen un recurso que día a día adquiere mayor importancia, pues son distinguidas por ser fuentes primarias, complementarias o alternativas de aprovechamiento en cuencas que presentan un acceso limitado a aguas superficiales, y también por su influencia en obras civiles, túneles, carreteras, proyectos mineros, entre otros (Minambiente, 2019). Este recurso es extraído de los acuíferos, los cuales son una formación, o grupo de formaciones geológicas, conformada por materiales lo suficientemente permeables y saturados como para almacenar cantidades significativas de agua que transitan a pozos y manantiales (USGS 2016).

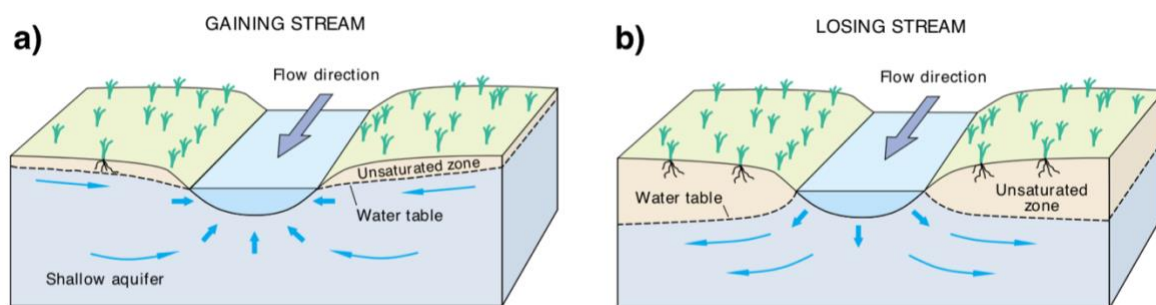
Las aguas subterráneas representan la mayor parte de los recursos hídricos utilizables en el planeta y en Colombia se tiene un gran potencial hidrogeológico. El IDEAM, en sus Estudios Nacionales del Agua (ENA), identificó en el país 16 Provincias Hidrogeológicas y un área potencial de acuíferos equivalente al 74,5% del territorio nacional, con reservas favorables estimadas del orden de 5.848 km<sup>3</sup>, que corresponden al 72% del recurso hídrico total del país (IDEAM, 2015).

Las llanuras de inundación de los ríos forman acuíferos aluviales usualmente de alto potencial de producción de agua (Hiscock & Grischek 2002). Para poder determinar las condiciones favorables para el almacenamiento de agua subterránea en este tipo de acuíferos es necesario entender, entre otros factores, la interacción río-acuífero. Esta puede interpretarse como la intercomunicación entre la formación permeable (almacenadora de agua subterránea) y los cuerpos de agua superficial como ríos, lagos, lagunas, ciénagas, etc. Estas interacciones son complejas pues, para entenderlas en relación con factores climáticos, de relieve del terreno, geológicos y bióticos, se necesita un marco hidrogeológico robusto (Sophocleous, 2002).

Esta interacción depende de varios factores o parámetros, sobresaliendo la conductancia hidráulica, que está definida como la eficacia con que los fluidos se mueven a través del suelo entre río-acuífero (Trujillo et al., 2018). Este parámetro o propiedad depende del grado de saturación y la naturaleza del suelo. A través de su evaluación para definir la interacción río-acuífero se pueden llegar a hacer valoraciones de las reservas y recursos

subterráneos, porque ayuda a la estimación de la recarga, siendo insumo de los modelos precipitación – infiltración – recarga, procesos que se presentan en el tránsito de flujo por la zona parcialmente saturada. También es materia prima importante para la realización de modelos numéricos directos e inversos en hidrogeología de flujo y transporte (Donado, 2004).

Entendiendo la interacción río-acuífero se establece que, en términos generales, las corrientes superficiales ganan agua y solutos provenientes de los acuíferos y, a su vez, los mismos ríos actúan como fuente de recarga para los acuíferos, además de que ejercen cambios en la calidad del agua. Esta interacción se da a través del lecho y las bancas del río y toma lugar en tres formas básicas, dependiendo del gradiente hidráulico existente entre el río y el acuífero: 1) las corrientes reciben agua proveniente de los acuíferos cuando el nivel del agua en el río está por debajo del nivel piezométrico y, por lo tanto, se genera un gradiente hidráulico en dirección al río (corriente/flujo ganador, Figura 1a); 2) las corrientes le entregan agua a los acuíferos cuando el nivel del agua en el río está por encima del nivel piezométrico, generando un gradiente hidráulico en dirección al acuífero (corriente/flujo perdedor, Figura 1b); 3) puede suceder de ambas formas a la vez, que la corriente se comporte como ganadora en algunos tramos y como perdedora en otros (Winter et al., 1998). Debido a esta interacción, actividades antrópicas como la extracción de agua de arroyos, puede agotar el agua subterránea o, por el contrario, el bombeo de agua subterránea puede generar el agotamiento del recurso en los arroyos, lagos o humedales (Winter et al., 1998).



**Figura 1.** Esquema generalizado de los procesos de interacción entre el agua subterránea y el agua superficial (interacción río-acuífero). Modificado de Winter et al., (1998). a) corriente ganadora. b) corriente perdedora.

Lograr entender las interacciones entre el acuífero y el río hace necesario el uso de diversos instrumentos, entre los que se destacan los métodos geoelectricos. Éstos son un método de carácter indirecto (no invasivo) que se basa en interpretar los distintos materiales del subsuelo, a partir de las variaciones de la resistividad al paso de la corriente eléctrica (Estrada, 2013).

Entre los métodos geoelectricos más utilizados están los Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) y las Tomografías de Resistividad Eléctrica (TRE). Ambos constituyen métodos rápidos, efectivos y económicos para la caracterización de una zona. Adicionalmente, las TRE han mostrado en los últimos años un incremento en su utilización ya que presenta la ventaja, en comparación con los SEV, de obtener perfiles de resistividad continuos a partir del desarrollo de potentes programas de inversión (Ellis y Oldenburg, 1994).

Según estos autores, a partir de dichos perfiles se puede ver claramente la presencia de discontinuidades como fallas o cambios litológicos abruptos. Así mismo, dichos métodos son de amplio uso en la búsqueda, caracterización y entendimiento de los acuíferos, ya que permiten identificar los acuíferos, determinar el tipo de material, el nivel de saturación de los materiales geológicos, la profundidad aproximada del agua en el suelo, entre otras variables (Cardozo y Vargas, 2015).

La identificación de los tipos de materiales en un acuífero, la determinación de la saturación que presentan, así como el tener en cuenta el parámetro de conductancia en términos de la granulometría, posibilita entender, de forma aproximada, la interacción que hay entre el río y el acuífero debido a la variación de la lectura resistiva de dichos materiales producto de la saturación por la ocurrencia de fluidos, más precisamente el agua del río, que se encuentra en contacto directo con la formación/acuífero.

Técnicamente, estos métodos geoelectricos consisten en la inyección de corriente continua en el terreno mediante un par de electrodos y la determinación de la diferencia de potencial, mediante otro par de electrodos. La magnitud de esta medida depende, entre otras variables, de la distribución de resistividades de las estructuras del subsuelo, de las distancias entre los electrodos, de la corriente inyectada, del tipo de material, del nivel de saturación y de la calidad de agua en el suelo (Alfonso, 1997).

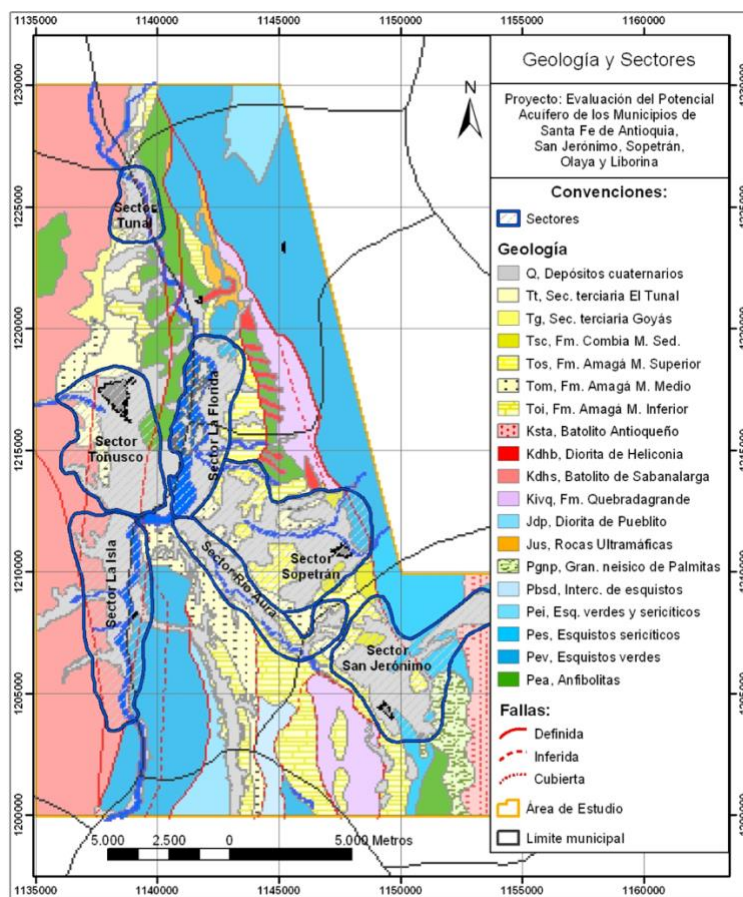
Como se mencionó anteriormente, el IDEAM ha llevado a cabo la elaboración de varios Estudios Nacionales del Agua (ENA) que se han convertido en un importante insumo técnico para la planificación y la gestión integrada del recurso hídrico): ENA 2010 (IDEAM, 2010), ENA 2014 (IDEAM, 2015) y ENA 2018 (IDEAM, 2019). En el ENA 2010 se realizó la subdivisión del país en 16 provincias hidrogeológicas (PGH), que fueron caracterizadas asociándolas a las principales cuencas sedimentarias de Colombia, establecidas en 2007 por la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH). En el segundo ENA 2014, se destaca la clasificación hidrogeológica de mayor detalle, en la cual se identificaron 61 sistemas acuíferos (SA) en el territorio nacional. El ENA 2018 aún no se ha publicado completamente, sólo algunos de sus avances.

Uno de los SA incluidos en el ENA 2014 es el de Santa Fe de Antioquia (SAM6.4), localizado en la jurisdicción de Corantioquia, y comprendido por los municipios de Sopetrán, San Jerónimo, Olaya, Liborina y Santa Fe de Antioquia. Dicho SA se ubica regionalmente al occidente del departamento de Antioquia (Colombia), entre la margen occidental de la cordillera Central, en la depresión intracordillerana Cauca - Patía, y la margen oriental de la cordillera Occidental. Este sistema acuífero está caracterizado como de tipo libre, con un área superficial de 103 km<sup>2</sup>, conformado por depósitos aluviales provenientes del río Cauca, materiales de ríos tributarios y depósitos de vertientes (IDEAM, 2014).

A lo largo de los años, diversos trabajos realizados por la Corporación en asociación con otras entidades públicas y privadas han buscado aportar al conocimiento hidrogeológico de este Sistema Acuífero. Entre ellos, sobresale el realizado por Corantioquia-UNAL (2004), donde se elaboró una evaluación del potencial acuífero de los municipios de Santa Fe de Antioquia, Sopetrán, San Jerónimo, Olaya y Liborina, con la finalidad de reunir conocimiento integral de los acuíferos con sus zonas de recarga y las amenazas actuales y potenciales de contaminación.

Adicionalmente, se dividió este SA en siete sectores geológicos: Tunal, La Florida, Sopetrán, Río Aura, San Jerónimo, La Isla y, finalmente, Tonusco, el cual es el foco de interés de este estudio (Figura 2). En dicho sector se destaca la presencia del río Tonusco, definido como un río trenzado, con un caudal medio de 8,75 m<sup>3</sup>/s, muy dinámico y con la

particularidad de que entrega sus aguas al río Cauca en contra flujo (Corantioquia-SHI 2015). Adyacentes al cauce del río Tonusco se identificaron depósitos de aluviones recientes y la ocurrencia de terrazas aluviales con una alta variación granulométrica entre sus estratos.



**Figura 2.** Sistema Acuífero Santa Fe de Antioquia con sus sectores geológicos. Tomado de Corantioquia-UNAL (2004).

Entre las herramientas utilizadas en ese estudio están los métodos geoelectricos, más precisamente, los SEV. En total, realizaron 96 SEV distribuidos a lo largo y ancho del sistema acuífero, 15 de ellos ubicados específicamente en el sector Tonusco. En este trabajo los autores resaltaron, entre otras cosas, que en el sector del río Tonusco fue difícil realizar prospección geofísica (con SEV) debido a la alta variabilidad en su composición, tanto vertical como lateralmente, debido a la dinámica de río trenzado.

El segundo estudio lo realizó en 2015 la empresa privada Servicios Hidrogeológicos Integrales (Corantioquia-SHI, 2015). Allí se llevó a cabo una actualización del primer

estudio, resaltando el uso que se da sobre las fuentes de abastecimiento por parte de organizaciones públicas o privadas y personas naturales. En este estudio no se incluyeron cambios significativos en los estudios de geoeléctrica.

Finalmente, en el año 2017, Corantioquia-SHI publica el documento titulado “Formulación del plan de manejo ambiental del Sistema Acuífero del Occidente Antioqueño en la territorial Hevíxicos de Corantioquia”, en el que se exhiben las amenazas por desabastecimiento del recurso hídrico. Dichas amenazas y problemáticas se asocian, principalmente, al crecimiento de la subregión (Occidente antioqueño), lo que ha generado un impacto sobre los recursos hídricos superficiales y subterráneos. De forma agregada, el auge del turismo, la actividad pecuaria, la minería extractiva, la falta de legalidad en el uso del agua subterránea y los procesos de sedimentación generados por la construcción de vías, también se posicionan como problemas y amenazas por desabastecimiento en esta subregión (Corantioquia-SHI 2017).

Algunos de los trabajos mencionados, resaltan los vacíos de conocimiento sobre la geología definitiva de los acuíferos y su potencial de explotación en ciertas zonas del país. De igual forma, enfatizan en la falta de actualizaciones que hay sobre este tipo de documentos, lo que genera desconocimientos sobre el detalle y las características actuales de los acuíferos, así como los depósitos que las suprayacen. Todo eso hace difícil entender la interacción entre acuífero y río, y la posibilidad de lograr su manejo sostenible en la región.

Dado el contexto anterior, el presente trabajo tiene como objetivo realizar e interpretar una serie de TRE sobre las terrazas aluviales del río Tonusco, así como hacer el correspondiente levantamiento geológico, para obtener mayor detalle en la caracterización geológica del acuífero. Finalmente, se busca con este trabajo poder definir con mayor precisión la geología de la zona de interés para obtener una aproximación al entendimiento de la interacción río-acuífero, a partir del método de resistividad eléctrica.

## **2. Generalidades**

### **2.1. Objetivo general:**

Contribuir al entendimiento de la interacción acuífero-río en el sector Tonusco del sistema acuífero de Santa Fe de Antioquia mediante la realización de Tomografías de Resistividad Eléctrica (TRE) en la llanura aluvial del río Tonusco, cerca de la desembocadura en el río Cauca.

### **2.2. Objetivos específicos:**

- Recopilar y analizar la información existente de estudios de geología e hidrogeología realizados en la zona de interés, y sobre métodos geoelectricos aplicados al estudio de acuíferos y el entendimiento de su relación con los ríos.
- Realizar campañas de campo con el fin de establecer los lugares óptimos para la realización de las TRE, recopilar datos geomorfológicos, geológicos, estructurales y de niveles piezométricos.
- Llevar a cabo el procesamiento e inversión de los datos geofísicos para generar los perfiles geoelectricos del suelo, definir la geología del acuífero aluvial y, con base en la saturación de los materiales, determinar la profundidad actual de los niveles piezométricos.
- Elaborar un mapa con la ubicación de las TRE interpretadas, así como un mapa de isopiezas, y determinar, de forma aproximada, la dinámica río-acuífero y establecer las zonas donde se presenta una mayor interacción dentro del área de interés.

### **2.3. Pregunta de investigación**

¿Cómo se presenta la interacción río-acuífero en el sector del río Tonusco en términos de ganancia o pérdida de flujo y cuáles zonas del río son las que se evidencian con mayor interacción río-acuífero?

¿Cómo el método indirecto de TRE permite llegar a una aproximación al entendimiento de la interacción río-acuífero en el Sector del río Tonusco del sistema acuífero de Santa Fe de Antioquia y qué papel juega la saturación de los materiales para el entendimiento de dicha interacción?

#### **2.4. Hipótesis**

La alta variabilidad en la granulometría del lecho del río Tonusco, por el hecho de ser de tipo trenzado, hace que éste presente un comportamiento variable en términos de ganancia o pérdida a lo largo del tramo cercano a la desembocadura en el río Cauca.



### 3. Metodología

El procedimiento metodológico para llevar a cabo el presente trabajo de grado comprendió 5 etapas: revisión, precampo, campo, postcampo y, finalmente, resultados, tal como se muestra en la Figura 3. A continuación, se hará una breve descripción de cada una de estas etapas.

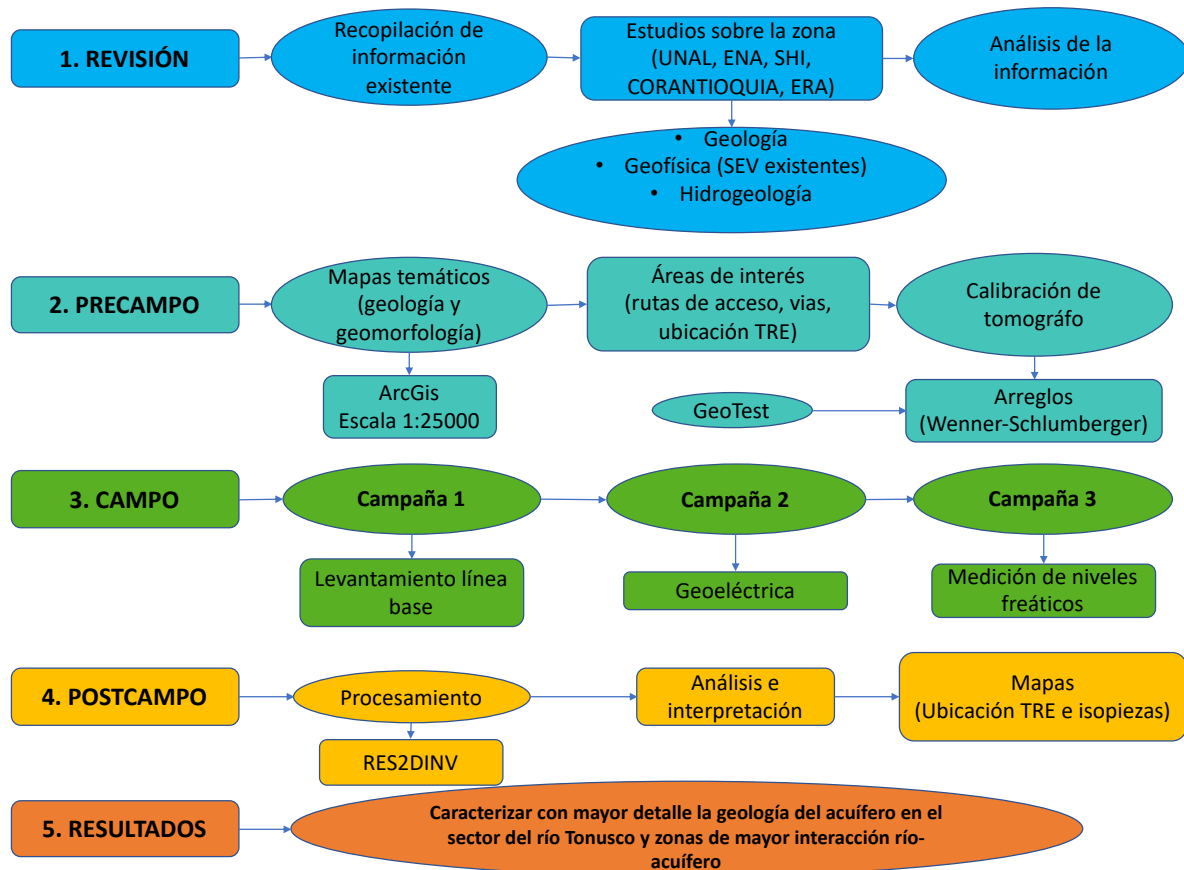


Figura 3. Flujograma del proceso metodológico. Creación propia.

#### 3.1. Etapa de consulta

En esta etapa se elaboró una búsqueda de información bibliográfica, en formato digital y físico, basada en informes elaborados por entidades del gobierno como la Corporación Autónoma Regional de Antioquia (Corantioquia), el Instituto de Hidrología, Meteorología

y Estudios Ambientales (IDEAM), el Servicio Geológico Colombiano (SGC) y el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). También se utilizaron documentos elaborados por la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín (UNAL), y empresas privadas como Servicios Hidrológicos Integrales (SHI) en conjunto con Corantioquia.

Respecto a la información recolectada, se hizo énfasis en la información de los siguientes documentos debido a la conveniencia de sus tópicos: a) “Evaluación del Potencial Acuifero en los Municipios de Santa Fe de Antioquia, San Jerónimo, Sopetrón, Olaya y Liborina” elaborado por el Instituto del Agua de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín en convenio con CORANTIOQUIA, en el año 2004; b) “Estudio Nacional del Agua” realizado por el IDEAM en el año 2010, y actualizado en 2014; c) “Diagnóstico para la formulación del Plan de Manejo Ambiental del Sistema Acuifero del Occidente Antioqueño en la territorial Hevíxicos de Corantioquia”, desarrollado por la entidad privada Servicios Hidrológicos Integrales (SHI) en el año 2015; d) “Formulación del Plan de Manejo Ambiental del sistema acuifero del Occidente Antioqueño” realizado por Corantioquia y SHI en el año 2017.

Además, se hizo uso de la plancha geológica 130 (escala 1:100.000) del municipio de Santa Fe de Antioquia, elaborada por INGEOMINAS en el año 1983 y su versión digital en el 2009, así como la plancha topográfica 130IIIB3 del municipio de Santa Fe de Antioquia (escala 1:10.000), elaborada en el 2013 por el IGAC. Adicionalmente, se contó con el insumo de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) de la Geodatabase (GBD) Cartobase de Antioquia, a escala 1:25.000, creada por Corantioquia y la GBD de la plancha topográfica 130IIIB3, proporcionada por el IGAC. Por último, se revisaron los datos geofísicos de la zona de interés, que se encuentra en los textos base.

### **3.2. Etapa de precampo**

En el desarrollo de la etapa de precampo se buscó establecer los lugares de interés para la aplicación de las Tomografías de Resistividad Eléctrica (TRE). Para ello se tuvo en cuenta la ocurrencia de llanuras aluviales adyacentes al río Tonusco, la topografía del terreno, las vías de acceso, la geología, geomorfología y la información secundaria de Sondeos Eléctricos Verticales (15 en total en la zona de estudio) realizados por UNAL-

Corantioquia (2004). Para tal fin, se realizaron mapas geológicos y geomorfológicos preliminares basados en la Cartobase con escala 1:25.000 de Corantioquia.

Posterior al establecimiento de los lugares de interés, se procedió a definir el tipo de arreglo geométrico a utilizar y la distribución espacial de los electrodos para la toma y adquisición de datos. Para ello fue necesario hacer una calibración del equipo (4 Point Light 10w, marca Lippmann Geophysical Equipment y propiedad de la Universidad EAFIT) pues éste había sido recientemente reparado debido a daños sufridos en salidas previas. La calibración constó en la adquisición de datos geoelectricos en una línea ubicada en la cancha de grama del campus principal de la Universidad EAFIT, en Medellín, el día martes 19 de febrero del 2019. Una vez en campo, los datos adquiridos durante el proceso fueron corroborados mediante el levantamiento geológico.

Para finalizar, se llevó a cabo una capacitación para el uso del software Geotest, el cual va incluido con el equipo. Este software permite controlar equipos geoelectricos en combinación con varios electrodos.

### **3.3. Etapa de campo**

Se realizaron dos (2) salidas de campo entre los meses de enero y febrero de 2019. La primera salida consistió en el reconocimiento del área de estudio, el análisis del estado de las vías y la identificación de las zona óptimas para la ejecución de las TRE, teniendo en cuenta la cercanía al río y la facilidad de acceso.

Se destaca que en la primera salida se realizó un levantamiento de la línea base, el cual constó de la descripción de la geología del área de interés, haciendo énfasis en las terrazas y depósitos presentes, así como de la geomorfología que dicha área comprendía (Anexo 1 Digital. Informe de primera salida de campo Proyecto de grado).

Durante la segunda salida de campo se efectuaron los ensayos geoelectricos, que consistieron en 10 tomografías de resistividad eléctrica (TRE) con arreglo Wenner-Schlumberger y separación entre electrodos de 1 o 2 m, para tener buena resolución lateral y vertical (Anexo 2 Digital. Informe de segunda salida de campo Proyecto de grado). Adicionalmente, se utilizaron 2 TRE realizadas durante la asignatura de Geología de Campo II, en el semestre 2017-2. Los detalles de estas tomografías, así como su procesamiento e interpretación, se presentan en el Capítulo 5.

Cabe destacar que se hizo una medición del nivel freático estático en 6 aljibes presentes en el área de estudio (4 en la margen derecha y 3 en la margen izquierda del río, en contra del flujo del cauce de este) utilizando una sonda de nivel de agua (101 P7 Water Level Meter, marca Solinst y propiedad de la Universidad EAFIT), con el objetivo de apoyar la información geoeléctrica.

### **3.4. Etapa de postcampo**

Durante esta etapa se llevo a cabo el procesamiento y análisis de la información geoeléctrica recopilada en la salida de campo. Para la realización del procesamiento de las Tomografías de Resistividad Eléctrica (TRE) se implementó el software RES2DINVS64 ver.4.06.18, desarrollado por la empresa GEOTOMO SOFTWARE, con licencia adquirida por la Universidad EAFIT.

Este software permite realizar modelos bidimensionales de resistividad para el subsuelo en los arreglos geométricos Wenner, Wenner- Schlumberger, Dipolo-Dipolo, Polo-Dipolo, entre otros, utilizando diferentes modelos de inversión. El software puede ser ejecutado en cualquier ordenador que cuente con el sistema operativo Windows (Software & Heights, 2014). El numeral 5.2 del presente documento, denominado “Procesamiento de las TRE”, explica con mayor detalle la metodología llevada a cabo para realizar el procesamiento de los datos de las TRE, donde se destaca la parametrización del modelo, la cual consiste en organizar y estandarizar la información que se ingresa en el software con el objetivo de obtener un modelo lo más cercano posible a la realidad, haciendo múltiples ensayos para lograr tal fin.

Posteriormente, se realizó el “Ajuste de rangos de resistividad para despliegue de resultados”, contenido en el numeral 5.3, que consistió en la organización de las variables correspondientes al numero de datos, corriente, voltaje y resistividad en un archivo de Excel, para establecer con mayor criterio la relación y alteración que hay entre cada una de estas variables. Después, se realizó una estandarización de los de colores asignados a cada rango de resistividades para el ambiente estudiado en específico. De este modo, se generó un modelo de inversión más entendible y correlacionable con la litología observada en la zona de estudio.

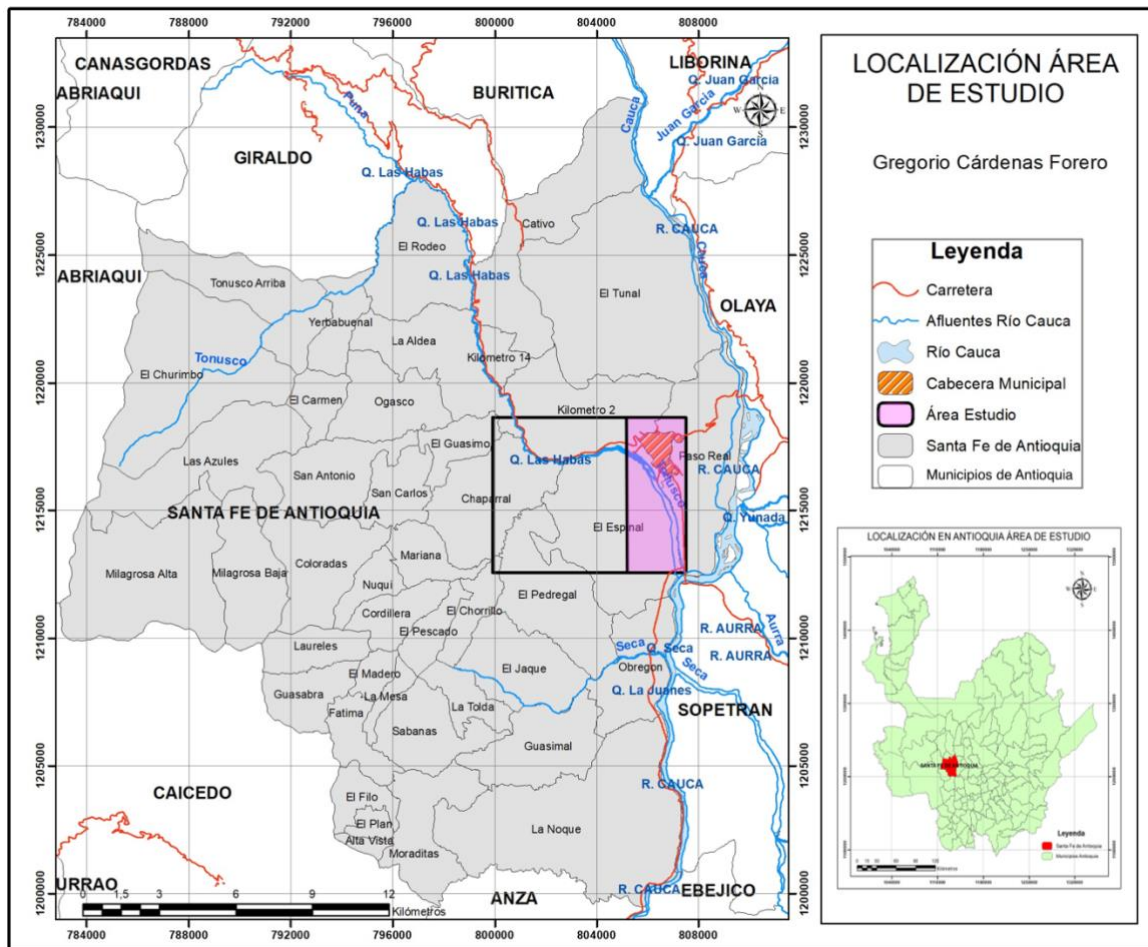
De manera suplementaria, los mapas levantados en campo (geología, geomorfología y ubicación de las TRE) se digitalizaron haciendo uso del software ArcMap 10.5 y se presentan el Anexo 3 (digital).

Una vez llevadas a cabo las etapas de procesamiento y estadística de los datos, en las que se obtuvieron los modelos de inversión final, se procedió a ejecutar el análisis, interpretación, caracterización y delimitación (TRE tipo, ver numeral 6. Resultados) de estos. Para tal fin, se acudió al conocimiento de personal experto en el tema (profesores de la universidad EAFIT), como forma de apoyo, para finalmente, obtener los resultados que se plasman en el presente trabajo.

## 4. Área de estudio

### 4.1. Localización

El área de estudio se localiza en el municipio de Santa Fe de Antioquia, en el sector del río Tonusco, específicamente en el costado Oeste de la cabecera municipal, abarcando las veredeas El Espinal y Paso Real, con un área aproximada de 15.70 km<sup>2</sup> (Figura 4).



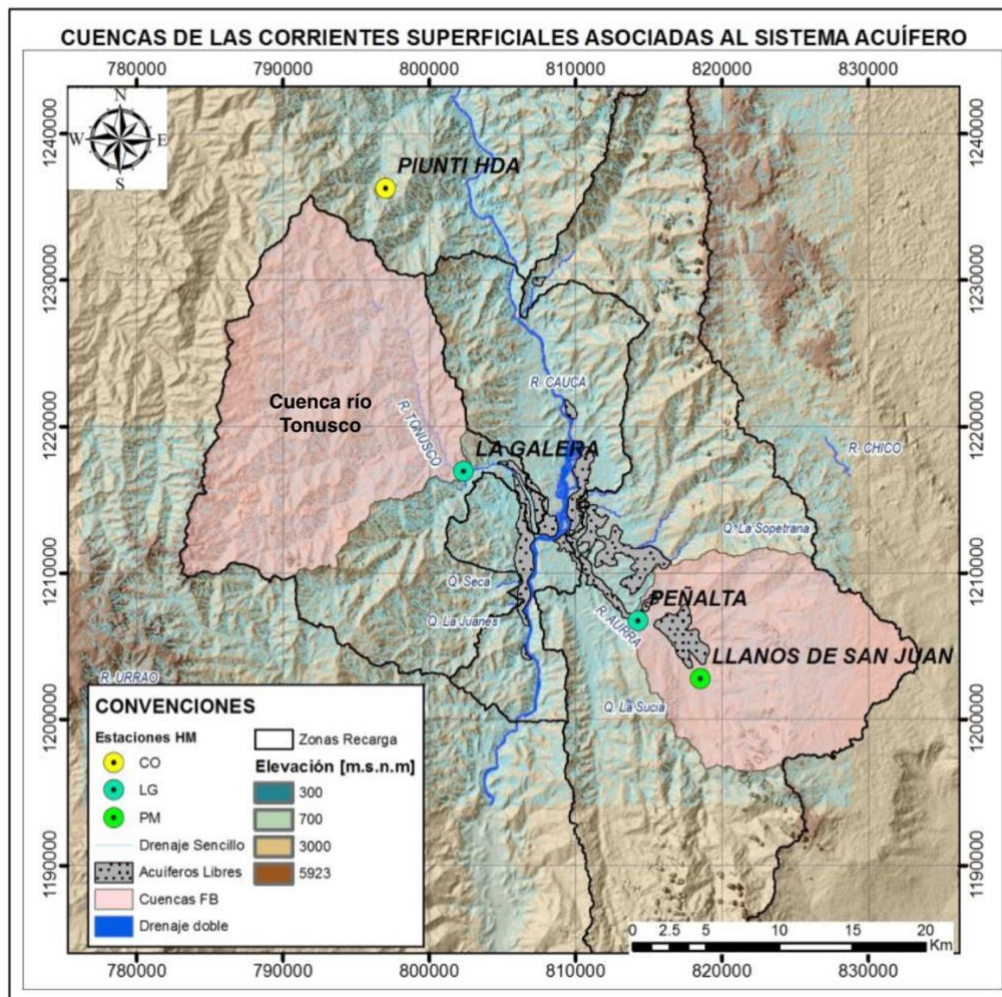
**Figura 4.** Localización de área de estudio. Creación propia. El recuadro magenta muestra el área de estudio, que hace parte de la plancha 130IIB3 que está representada por el recuadro negro.

En términos más específicos, el río Tonusco es definido como un río trenzado, con un caudal medio de 8,75 m<sup>3</sup>/s, muy dinámico y con la particularidad de que entrega sus aguas al río Cauca en contra flujo (Corantioquia-SHI 2015). Este río deposita materiales granulométricamente variados y aptos para la acumulación de agua; la poca homogeneidad

del depósito dificulta la exploración del recurso hídrico (Restrepo, 2004). Así mismo, hace parte de los tributarios del Cauca, junto con los ríos Aura y las quebradas Seca, La Sopetrana, Chorquina, La Colchona, Barbuda y Juan García entre otras.

La cuenca del río Tonusco presenta una particular configuración geomorfológica, la cual hace que sea considerablemente más amplia en su zona alta y muy estrecha (por control geológico) en su parte baja (Figura 5), donde aflora el acuífero libre de Tonusco, que cuenta con un área superficial de 4.787.996 m<sup>2</sup>. Esta configuración propicia que haya una baja incidencia de los aportes de este acuífero a la cuenca, dado que la mayor captura de escorrentía se da en la zona alta de la misma.

La zona donde se encuentra el acuífero de Tonusco presenta una precipitación media anual de 1021 mm/año y con una recarga potencial por precipitación de 29.2, 62.8 y 72.9 mm/año para los periodos seco, húmedo y normal, respectivamente (Corantioquia-SHI, 2017). Para el río Tonusco, la escorrentía total está compuesta mayoritariamente por flujo base (porción del flujo que es generado por las aguas subterráneas y fluyen hacia el cauce principal (Salas et al., 2015), con un aporte promedio del 82%, mientras que el 18% restante corresponde a escorrentía superficial directa. El flujo base varía entre 299 y 722 mm/año y responde directa y proporcionalmente a las variaciones temporales de la escorrentía total (caudal medio) (Corantioquia-SHI, 2017).



**Figura 5.** Mapa de cuenca del río Tonusco. Modificado de Corantioquia-SHI (2017).



## 4.2. Geología

En el área de estudio, de acuerdo con la plancha 130 de Santa fe de Antioquia a escala 1:100.000 de INGEOMINAS, se presentan rocas sedimentarias, ígneas y metamórficas, además de depósitos de aluviones recientes que derivan en la ocurrencia de terrazas. Sobre el costado occidental de la zona de estudio afloran las rocas ígneas pertenecientes al Batolito de Sabanalarga (Kdhs) (Mejía, 1984). En la zona central del área de interés se presentan las rocas sedimentarias del Miembro Inferior de la Formación Amagá (Toi), conformada por conglomerados, areniscas conglomeráticas, areniscas, arcillolitas arenosas y arcillolitas pizarrosas, además de los depósitos de aluviones recientes y terrazas aluviales.

En la Tabla 1 se presentan las unidades geológicas aflorantes en la zona con su respectiva descripción según los autores que las definieron y, algunas observaciones producto del trabajo de campo que se realizó durante la elaboración de este trabajo de grado. La Figura 6 muestra la ubicación de dichas unidades en un mapa a escala 1:10.000 basado en la memoria explicativa de la plancha 130.

**Tabla 1.** Características de las unidades geológicas identificadas en el área de estudio.

Unidad geológica	Descripción*
Terrazas (Qt)	<p>“Restos del antiguo lecho de inundación de un río, caracterizadas por formar superficies planas o ligeramente inclinadas, limitadas por un reborde escarpado generalmente de poca altura... aparecen generalmente formando retazos discontinuos y de poca anchura, más o menos paralelos al río” (López, 1971).</p> <p>Estas unidades se lograron identificar a lo largo de las margenes izquierda y derecha del cauce del río Tonusco, con variaciones en la altura y la gradación, destacando gradaciones granodecrecientes de base a techo, y caóticas, entre arenas conglomeráticas, arenas gruesas, bloques y limos. Esto debido a la dinámica del río.</p>
Aluviones Recientes (Qar)	<p>Depósitos constituidos por gruesos bancos de grava con intercalaciones de arena y limo (López, 1971).</p> <p>Estos depósitos se encontraron localizados sobre la margen izquierda del río Tonusco, en el área de estudio. Identificados como depósitos aluviales clasto-soportados de clastos tamaño grava en matriz de limos y arena, con mala selección y alta energía de deposición.</p>

Unidad geológica	Descripción*
Formación Amagá Miembro Inferior (Toi)	Unidad que corresponde a conglomerados, areniscas conglomer ticas, areniscas cremas y grises, arcillolitas arenosas, arcillolitas pizarrosas grises a gris verdosas de edad Oligoceno temprano (Mejía, 1984).  Esta unidad se encontró aflorando sobre los depósitos de aluviones recientes, en la margen izquierda del río Tonusco, en el área de estudio.
Batolito de Sabanalarga - Diorita Hornbléndica (Kdhs)	Cuerpo alargado en dirección Norte-Sur, en el sector norte del occidente colombiano, entre las Cordilleras Central y Occidental. El cuerpo principal de esta unidad y sus apófisis corresponden a diorita hornbléndica con variaciones a tonalita; es común encontrar transiciones a gabros hornbléndicos y hornblénditas, principalmente hacia los bordes (Mejía, 1984).  Unidad identificada sobre la margen izquierda del río Tonusco, en el área de estudio. Se presenta con transición a gabro.

\* La primera parte de la descripción de cada unidad fue tomada de Mejía (1984) y la segunda parte fue resultado del trabajo de campo.

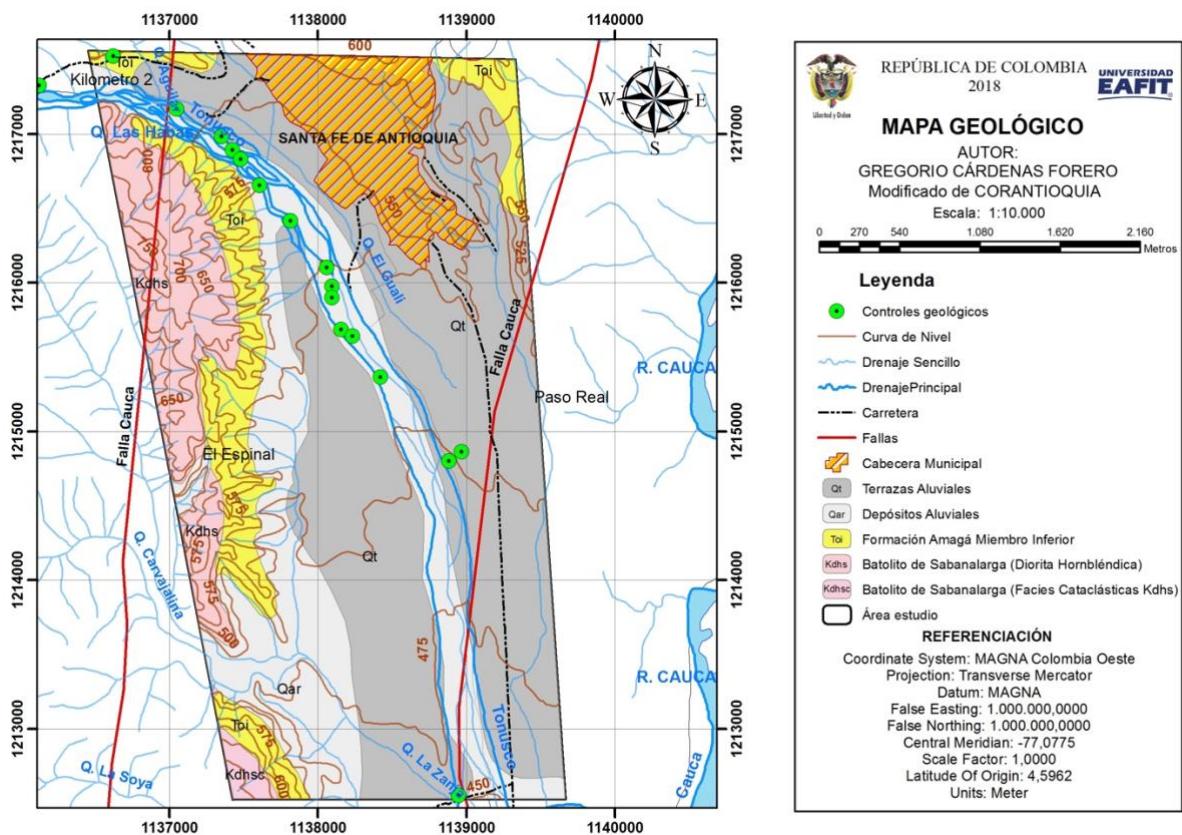


Figura 6. Mapa geológico del área de estudio. Creación propia.

### 4.3. Geomorfología

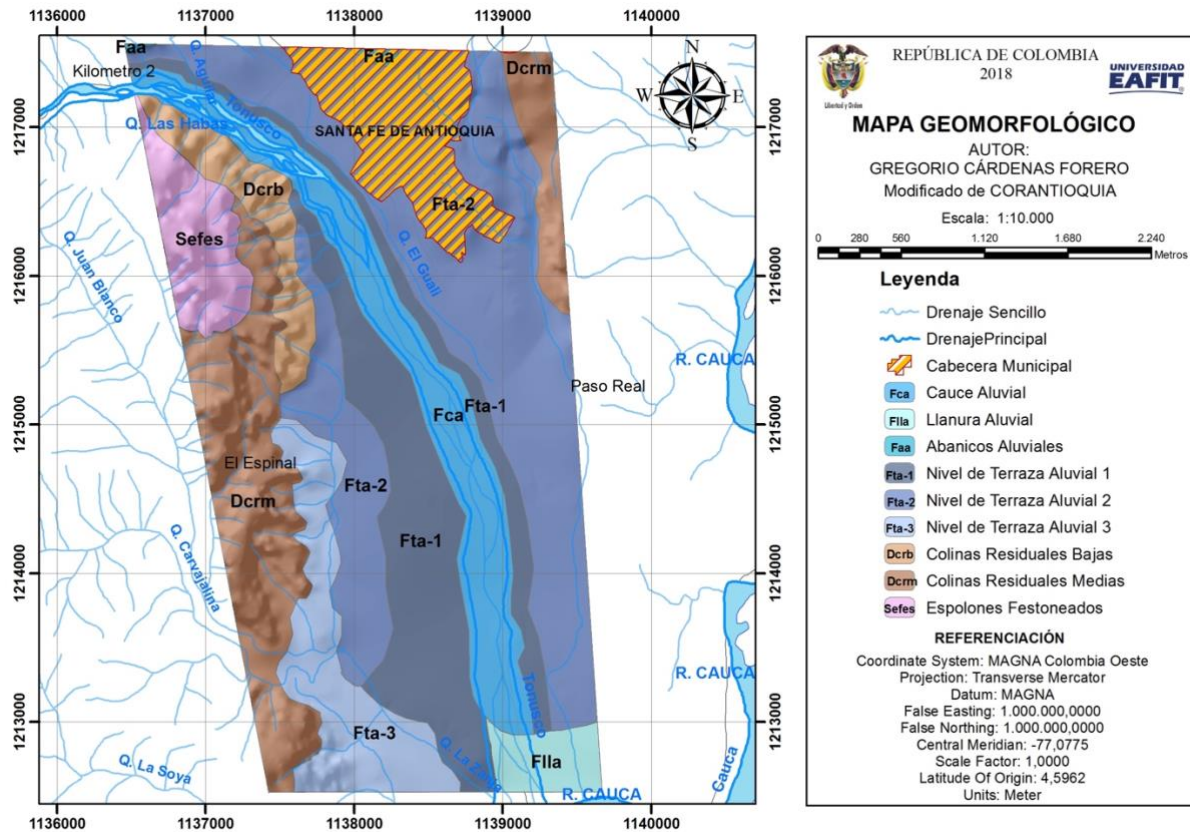
La geomorfología del área de interés presenta unidades que corresponden a tres ambientes geomorfológicos destacados: Denudacional, Fluvial y Estructural. El ambiente Denudacional se caracteriza por manifestar paisajes disectados como producto de los procesos exógenos generados por procesos de meteorización y erosión, que pueden ser de carácter hídrico y gravitacional, o una combinación de ambos (IDEAM 2013). El ambiente Fluvial incluye las geoformas que se originan por la erosión de las corrientes de los ríos y por la acumulación o sedimentación de materiales en las áreas cercanas a dichas corrientes (SGC 2015). Finalmente, el ambiente Estructural se encuentra conformado por las geoformas que resultan de los procesos relacionados con la dinámica de la Tierra, relacionados principalmente al plegamiento y fallamiento de las rocas (SGC 2015).

A continuación se presenta una descripción de las unidades geomorfológicas de la zona de estudio, identificadas durante trabajo de campo (Tabla 2) y el mapa geomorfológico a escala 1:10.000 con la localización de dichas unidades (Figura 7).

**Tabla 2.** Características de las unidades geomorfológicas identificadas en el área de estudio. Creación propia.

Código	Ambiente Geomorfológico	Unidad Geomorfológica	Descripción de la unidad
Fca	Fluvial	Cauce aluvial	Correspondiente al río Tonusco, con forma irregular y altamente excavado o labrado por la dinámica trenzada propia del río.
Flla		Llanura aluvial	Del río Tonusco, con morfología plana y conformada por barras laterales y centrales con alta energía depositacional, evidenciado por el gran tamaño de los clastos que las componen.
Faa		Abanicos aluviales	Ubicada hacia el NNE, abarcando parte de la cabecera municipal del municipio de Santa Fe de Antioquia. Con forma de cono y morfología plana, debido al alto grado de denudación que presenta la zona.
Fta-1		Nivel de terraza aluvial 1	Evidenciada de forma paralela al

<b>Código</b>	<b>Ambiente Geomorfológico</b>	<b>Unidad Geomorfológica</b>	<b>Descripción de la unidad</b>
			cauce del río Tonusco, con una altura aproximada entre 1.5 y 2 m y superficie suavizada.
Fta-2		Nivel de terraza aluvial 2	Con una altura aproximada de 2.5 a 5 m y superficie suavizada.
Fta-3		Nivel de terraza aluvial 3	Visualizada hacia los últimos 2 km de recorrido de campo, siguiendo el cauce del río Tonusco (de norte a sur) hasta su desembocadura en el Cauca, con una altura aproximada de 25 m y superficie suavizada.
Dcrb	Denudacional	Colinas residuales bajas	Visualizadas hacia la margen W del río Tonusco en el área de estudio, en la vereda El Espinal, con cimas redondeadas y limitadas por laderas cortas, con un índice de relieve moderado. Altura de aproximadamente 200 m
Dcrm		Colinas residuales medias	Visualizadas hacia la margen W del río Tonusco en el área de estudio, en la vereda El Espinal, con cimas redondeadas y limitadas por laderas moderadamente largas, con un índice de relieve moderado. Altura de más de 300 m.
Sefes	Estructural	Espolones festoneados	Ubicados hacia el costado NW del río Tonusco en el área de estudio. Con morfología alomada, pendiente inclinada y forma cóncava.

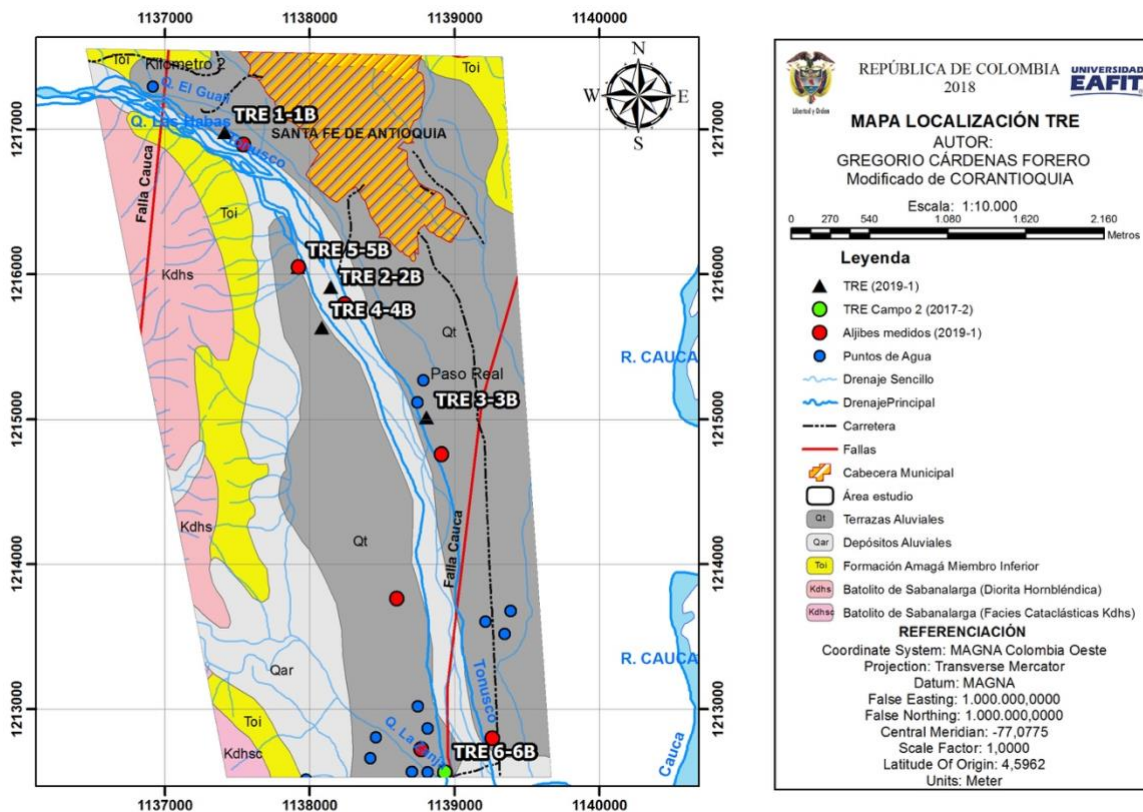


**Figura 7.** Mapa geomorfológico del área de estudio. Creación propia.

## 5. Prospección geofísica

### 5.1. Adquisición de datos

Para llevar a cabo el proyecto de grado, se desarrolló la etapa de adquisición de datos geoelectricos en el área de estudio (Anexo 2, digital). Las zonas de interés (Figura 8) corresponden a terrazas aluviales del río Tonusco, que son las unidades geomorfológicas más aptas para hacer el tendido de las TRE y que cuentan con la interacción más cercana al río. En total, se obtuvieron diez (10) TRE (triángulos negros en la Figura 7) y se utilizaron además dos (2) TRE adquiridas en el curso de Geología de Campo II del pregrado de geología durante el semestre 2017-2 (círculos verdes en la Figura 7).



**Figura 8.** Localización de Tomografías de Resistividad Eléctrica (TRE). Elaboración propia. En el presente mapa se destacan las TRE realizadas en la campaña de campo del 23 de febrero del 2019 (triángulo negro), las TRE de la campaña de Campo 2 del día 12 de octubre de 2017 (punto verde) y los puntos de agua (punto azul), que corresponden a pozos y aljibes cartografiados en la zona, algunos de estos aljibes fueron identificados (puntos rojos) y se les midió el nivel piezométrico.

En cada sitio escogido se tendieron un par de líneas: una paralela y la otra perpendicular al río Tonusco. Las TRE cuyo nombre involucra sólo números (1 a 6) corresponden a aquellas paralelas al río, mientras que aquellas con la letra B son las tendidas perpendiculares al río. En la Tabla 3 se presentan las características de cada una de las TRE.

**Tabla 3.** Características de las tomografías de resistividad eléctrica (TRE).

Nº TRE <sup>+</sup>	Norte (m)*	Este (m)*	Altura (msnm)	Longitud (m)	Prof. alcanzada (m)	Nº de electrodos	Separación (m)	Nº de datos	Rumbo
1	01216961	01137441	566	58	8.25	29	2	135	308°
1B				56	8.25	28	2	126	215°
2	01215888	01138149	543	58	8.25	29	2	135	328°
2B				52	8.25	26	2	108	079°
3	01214996	01138817	534	58	8.25	29	2	135	330°
3B				28	4.13	28	1	126	079°
4	01215616	01138099	540	56	8.25	28	2	135	318°
4B				29	4.13	28	1	105	254°
5	01216027	01137944	542	58	8.25	28	2	135	322°
5B				29	4.13	28	1	135	048°
6 <sup>+</sup>	01212265	01180710	489	380	41.3	38	10	531	335°
6B <sup>+</sup>				47	8.25	30	2	135	249°

\* Sistema de coordenadas Magna Colombia Oeste

<sup>+</sup> Las TRE que tienen B en su nombre son perpendiculares al río, mientras que las otras son paralelas al mismo.

<sup>++</sup> Tomografías adquiridas durante el curso de Geología de Campo 2, semestre 2017\_2

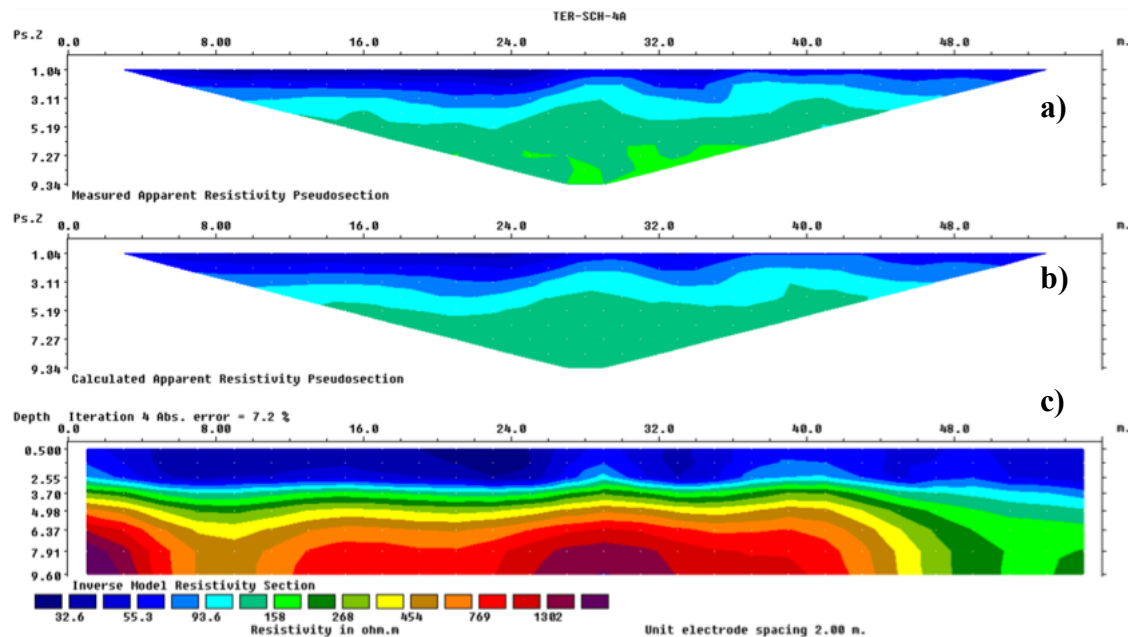
El tipo de arreglo geométrico utilizado durante la etapa de adquisición de datos fue Wenner-Schlumberger pues, al incorporar las ventajas de ambos arreglos, permite obtener amplias profundidades de investigación y, adicionalmente, genera una buena cobertura de datos tanto en la vertical como en la lateral, lo cual facilita obtener buenos contrastes entre las resistividades y así identificar las variaciones resistivas debido a la saturación de los materiales en el subsuelo, es decir, que permite apreciar la interacción entre el río y el acuífero. Asimismo, la separación entre los electrodos fue, en su mayoría, de 2 metros y algunas líneas (principalmente las orientadas de forma perpendicular al río Tonusco) tuvieron separación entre electrodos de 1 metro. Lo anterior se debió a la poca extensión lateral de la terraza.



Es preciso mencionar que sería menester implementar en el equipo una batería externa de más capacidad, ya que la que actualmente posee no alberga la capacidad suficiente para inyectar corriente y lograr alcanzar mayores profundidades de investigación.

## 5.2. Procesamiento de las TRE

Para llevar a cabo el procesamiento e interpretación de las TRE se hizo uso del software RES2DINV, basándose en los datos de resistividad aparentes, los cuales son ilustrados en una pseudosección aparente (Figura 9. a) y una pseudosección teórica (Figura 9. b). La sección aparente consta de curvas de isoresistividad que reflejan cualitativamente la variación espacial (2D) de resistividad aparente en el perfil investigado (ALH, 2007), mientras que la teórica es generada a partir de modelos matemáticos y parámetros de inversión del programa. Finalmente, se obtiene como resultado el modelo de inversión con resistividades reales (Figura 9. c). En el anexo 4 se presentan los datos crudos correspondientes a todas las TRE.



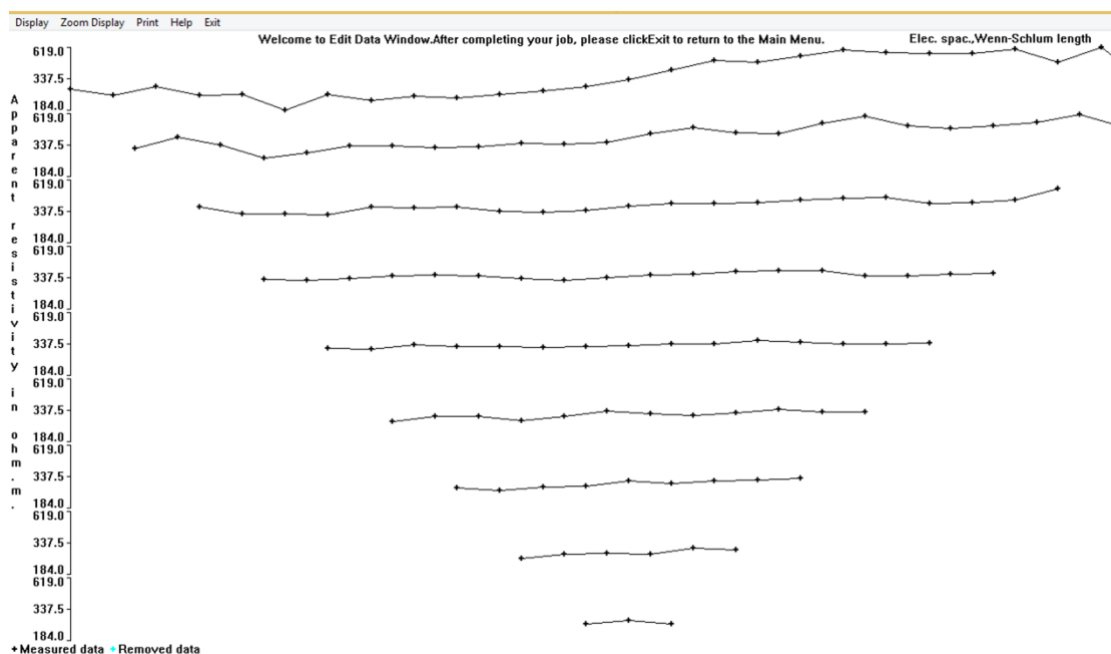
**Figura 9.** Tomografía de resistividad eléctrica (TRE). a) pseudosección aparente, b) pseudosección teórica, c) modelo de inversión final con la resistividad real (perfil geoelectrico), los costados sombreados corresponden a datos extrapolados debido al uso del modelo extendido (ver parámetros y modelamientos matemáticos).

Ejemplo correspondiente al procesamiento de la TRE 4.



Con el objetivo de obtener la pseudosección de resistividades reales fue necesario la parametrización del modelo, lo que implica organizar y estandarizar la información obtenida mediante la implementación de funciones del RES2DINV para optimizar la calidad de los datos aparentes (Loke, 1999) y así obtener un modelo final que mejor represente la realidad de lo que se presenta en la zona de estudio. A continuación se muestran las funciones utilizadas para tal fin, modificadas de Loke (1999):

Antes de entrar a explicar en detalle las funciones utilizadas fue necesario hacer un análisis del ruido (Figura 10) a partir de la función *exterminate bad data point*.



**Figura 10.** Análisis de ruido a partir de la función *exterminate bad data point*. Ejemplo correspondiente al procesamiento de la TRE 2.

La función *exterminate bad data point* permite eliminar los datos que presentan valores de resistividad notablemente erróneos (anómalos) con los niveles de adquisición. Cabe aclarar que el uso de esta función no implicó la eliminación de ningún dato, pues la presencia de un dato anómalo no necesariamente implica que este sea netamente erróneo, pudiendose deber esto a las variaciones litológicas en el terreno; además, los datos obtenidos de la adquisición del presente trabajo no evidenciaron cantidades de ruido sobresalientes. Lo que se buscó a partir de esta función fue identificar la mayor cantidad de ruido (picos que deflectan hacia arriba o abajo, ver Figura 10) en la adquisición para poder

aplicar las siguientes funciones con mayor criterio y así obtener un modelo más aproximado a lo observado en campo.

- *Damping factors*: función que depende de la cantidad de ruido disponible en la primera capa de los datos. Este es un parámetro tenido en cuenta por Loke (1999) en la fórmula de inversión de Gauss-Newton como  $\lambda$ , que permite disminuir la repercusión de datos de mala calidad en el modelo final de inversión. Los límites de amortiguación, que son rangos entre 0.3 para datos con un ruido considerable y valores de 0.1 para el caso contrario (Salas & Rosado 2018). En esta función los datos se ajustaron de acuerdo al ruido observado a partir de la función *Exterminate bad data point*.
- *Change of damping factor with depth*: Función para estabilizar el proceso de inversión. Alternativamente, permite que el programa calcule el valor para incrementar el factor de amortiguación con profundidad de forma automática mediante un cálculo automático.
- *Vertical to horizontal flatness filter ratio*: Este filtro establece un radio entre la amortiguación vertical y horizontal con el fin de priorizar alguna de estas dos teniendo en cuenta la disposición de la anomalías (Salas & Rosado 2018).
- *Diagonal filter*: o filtro de rugosidad diagonal, utilizado en componentes tanto de x como de z. Permite usar componentes en direcciones diagonales como sea.

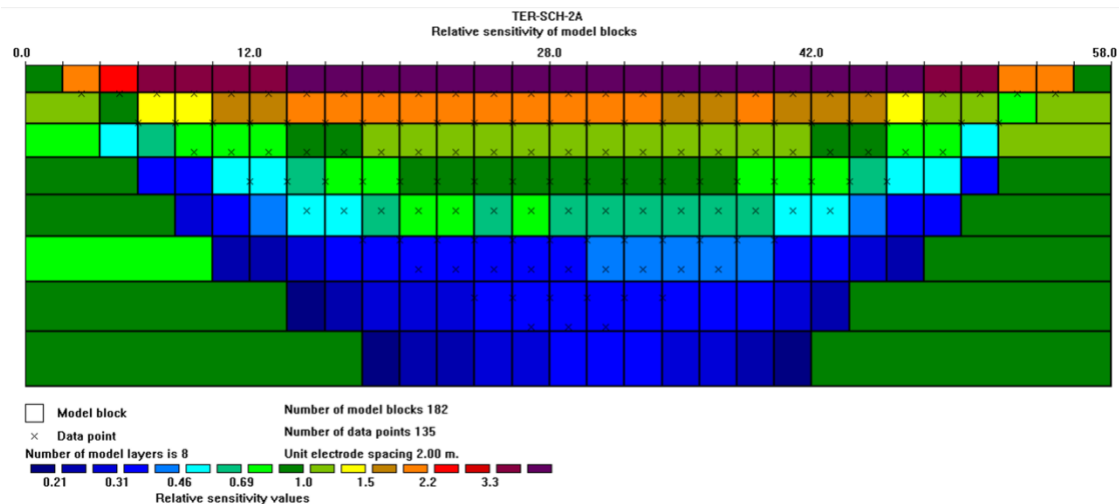
En los parámetros y modelamientos matemáticos durante el proceso de inversión (Figura 13) se modificó lo siguiente:

- *Forward modeling settings*: función que realiza la comparación entre los datos de campo y los modelos teóricos empleado en el procesamiento del modelo de mallado finito con 4 nodos para tener mayor acierto en la inversión. Tal como lo establece el software por defecto, si los datos presentan corrección topográfica se selecciona la función de *finite-element* y para el caso contrario *finite-difference*. Se seleccionó *finite-difference* debido a que las TRE se realizaron sobre terrazas que no presentaban variación en su topografía.
- *Convergence limit*: representando en valores entre el 1% y 5%, los cuales son los que el software recomienda por defecto.

- *Number of iterations:* Se utilizaron un máximo de 8 iteraciones (con la llave, que permite tener un holgado número de iteraciones), con el fin de obtener un amplio rango y disminuir el % de error; sin embargo, por lo general el modelo de inversión converge en 4 iteraciones.
- *Select robust inversion:* Se selecciona un modelo robusto que origina un contraste de resistividad alta para tener mayor realce de la resistividad en el modelo de inversión.
- *Modify smoothness constrained least - squares method:* esta función permitió aplicar la restricción de la suavidad en el modelo (Loke, 1999). Se aplicó con la finalidad de obtener un modelo final con valores de resistividad más suavizados, además de que la zona no se presentaba con una alta complejidad geológica.
- *Choose logarithm of apparent resistivity:* Se considera emplear la resistividad aparente de los valores dado que los contrastes de resistividad obtenidos no eran muy amplios, de lo contrario se implementa la función logarítmica .
- *Type of method to solve least square equation:* Se utilizó un modelo estándar realizando una solución exacta teniendo a disposición una cantidad de datos menor a 3000 mediciones (Loke, 1999). Si la cantidad de datos obtenida era mayor a 3000 se considera utilizar el modelo incompleto.
- *Model discretization – Display model blocks:* Genera una distribución del modelo de bloques de los datos, donde se aprecia la distribución de cada dato dentro de una cuadrícula.
- *Model discretization – Change thickness of layers:* En este parámetro se puede variar el grosor de los bloques en el modelo de inversión ajustándolo en la primera capa, y se puede modificar la tasa a la cual dicho grosor de cada capa subsecuentemente más profunda incrementa con la profundidad. Con esta función se buscó tener un modelo de bloques homogéneo y acorde a la cantidad de datos adquiridos (Loke, 1999).
- *Model discretization – Use extended model:* Se utilizó sobre la pseudosección de resistividades reales, empleando la disposición de los datos como una guía aproximada para discretizar el subsuelo en bloques rectangulares (Loke, 1999). No es recomendado utilizarlo para este tipo de trabajo dado que el modelo extendido genera una extrapolación de los datos externos (a los costados del modelo final, ver Figura 9c) lo cual no representa datos confiables, y puede originar malas interpretaciones. En el

presente trabajo se uso el modelo extendido con el objetivo de mostrar las zonas extrapoladas en cada TRE.

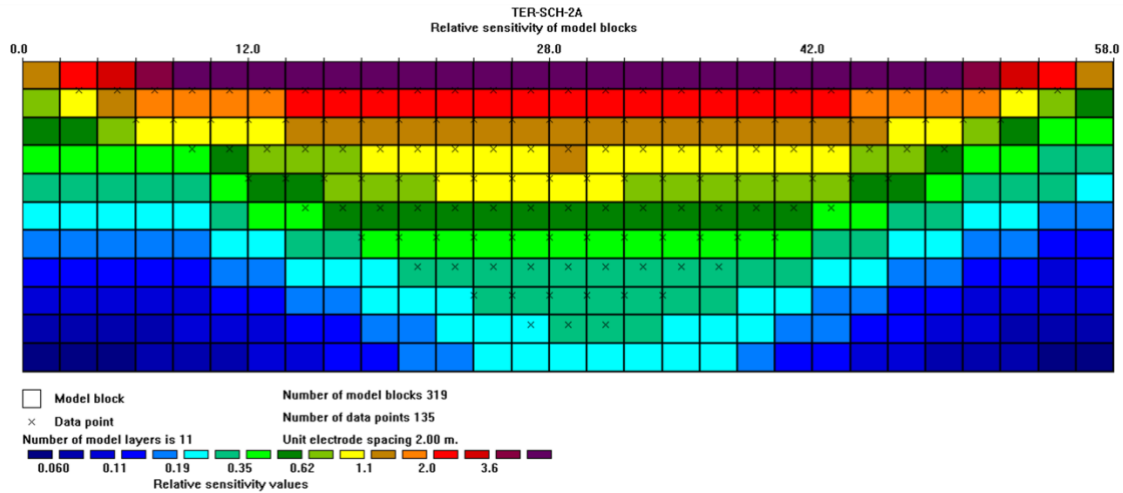
- *Model discretization – Reduce effects of side blocks*: Reduce el efecto de los bloques laterales en el proceso de inversión.
- *Model sensitivity options – Display model blocks sensitivity*: Muestra un gráfico de la sensibilidad de los bloques usada en el modelo de inversión. Este valor de sensibilidad es una medida de la cantidad de información sobre la resistividad de un bloque modelo contenido en un conjunto de datos medidos (Geotomosoft, 2016). Basicamente, esta función se utilizó para poder visualizar los lugares de la TRE en los que hubo un apropiado muestreo de la información resistiva sin usar el modelo extendido (altos valores de sensibilidad, ver Figura 11).



**Figura 11.** Modelo de sensibilidad de bloques. Ejemplo correspondiente al procesamiento de la TRE 2. Notar que a medida que la profundidad aumenta los valores de sensibilidad (Relative sensitivity values) disminuyen, lo que indica una baja precisión de datos en ese punto (bloques azules).

- *Model sensitivity options – Display subsurface sensitivity*: Permite visualizar un gráfico de la sensibilidad del subsuelo para bloques de igual tamaño. Esto basicamente elimina el efecto de los cambios en el tamaño del bloque modelo para que muestre más claramente el cambio de la sensibilidad del subsuelo con la profundidad y la ubicación (Geotomosoft, 2016). En pocas palabras, despliega un modelo extendido con bloques equitativos en donde los bloques con menores valores de sensibilidad corresponden a

datos extrapolados debido al uso del modelo extendido (bloques con menores valores de sensibilidad, ver ).

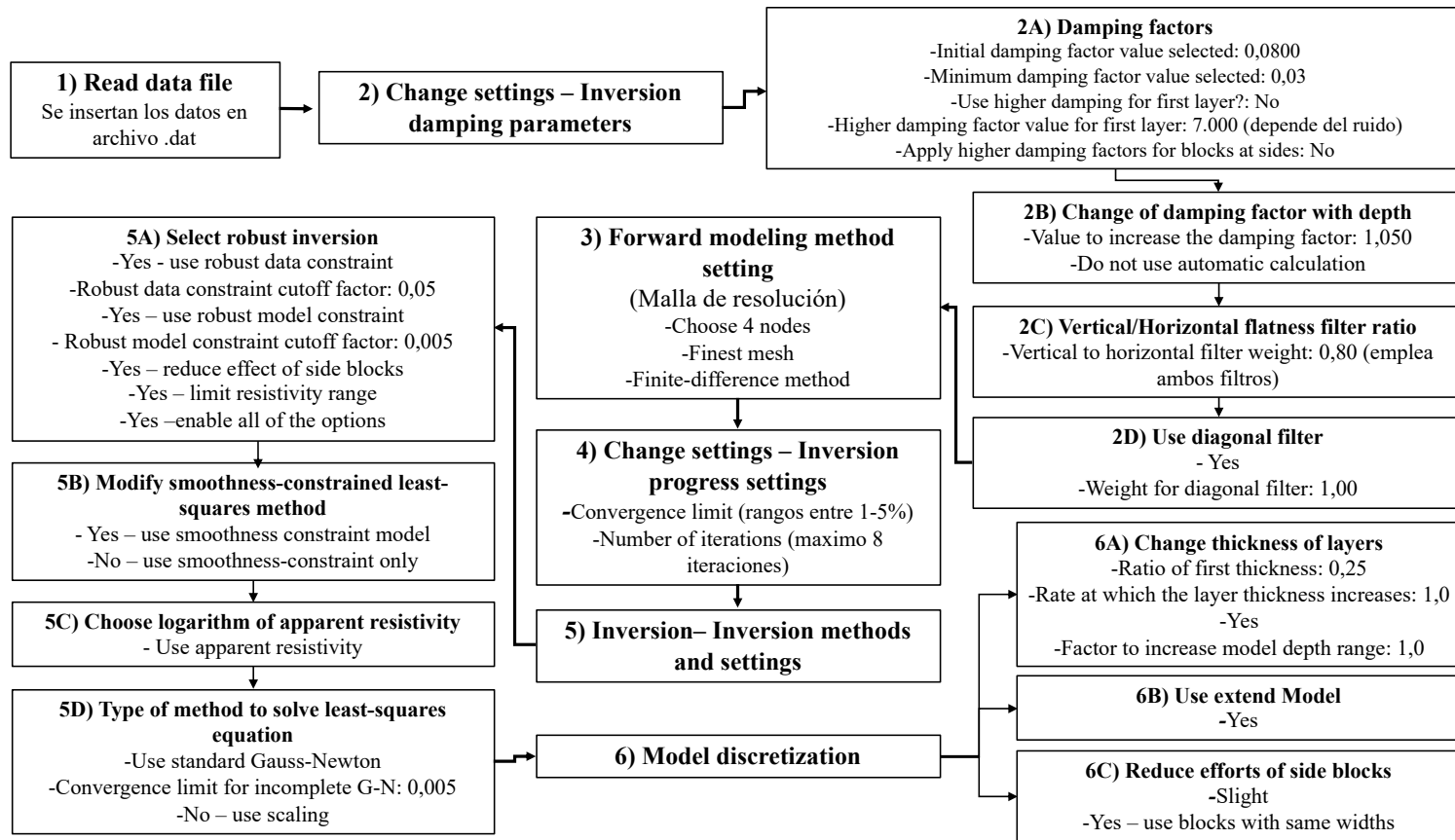


**Figura 12.** Modelo de sensibilidad del subsuelo. Ejemplo correspondiente al procesamiento de la TRE 2. Notar que los menores valores de sensibilidad (bloques azules) se encuentran a los costados inferiores del modelo, esto debido a la extrapolación de los datos que genera el uso del modelo extendido.

- *Model sensitivity options – Generate model blocks:* Esta opción asigna la disposición de los bloques en el modelo utilizando los valores de sensibilidad como una guía (Geotomosoft, 2016).

El flujograma correspondiente a la Figura 13 exhibe los pasos que se llevaron a cabo en el software RES2DINV para realizar el procesamiento de los datos geoelectricos obtenidos de las TRE. Cada numeral corresponde a una función propia del ya mencionado software, la cual se ajustaba de acuerdo a factores como la geología observada en la zona (calibración), las variables obtenidas de los datos geoelectricos y el ruido observado en la previsualización de dichos datos geoelectricos (análisis de ruido, Figura 10). Lo anterior se hace con la finalidad de obtener un modelo de inversión lo más fiel posible a la realidad.

Es importante aclarar que para poder llegar a obtener tal modelo aproximado a la realidad fue necesario realizar múltiples procesamientos, en los cuales se iban modificando gradualmente los parámetros de las funciones anteriormente mencionadas. Algunos de estos parámetros se dejaron por defecto debido a que el modelo final que generaban era más acorde a lo visualizado en campo.



**Figura 13.** Flujograma del procesamiento de las TRE. Creación propia

### 5.3. Ajuste de rangos de resistividad para despliegue de resultados

Con el fin de generar un modelo de inversión más entendible, en el que las resistividades presenten unos rangos de colores estandarizados que sean correlacionables con la litología, se realizó esta etapa. Esta etapa consistió en convertir las variables obtenidas de la adquisición, de un archivo .TXT, a un archivo de Excel. Estas variables son: número de datos (num), corriente (I), voltaje (U) y resistividad (rho), tal como se muestra en la Figura 14. Lo anterior se realizó para tener una mayor facilidad de manipulación de los datos y para poder relacionar esas variables entre sí (Figura 14b). Finalmente, se busca hacer una estandarización de los colores asignados a cada rango de resistividades para el ambiente estudiado en específico, con lo que se puede, teniendo en cuenta el trabajo de campo y lo obtenido en el proceso de inversión (5.2. procesamiento de las TRE), establecer una correlación con la litología de la zona.

La Figura 14b presenta la tabla que relaciona las variables de voltaje (U) y corriente (I) con la resistividad (rho), de lo cual se puede inferir que para los valores obtenidos en la columna de la izquierda (U y I) hay un solo (1) dato de resistividad (columna derecha cuenta de rho). Por ejemplo, para la fila resaltada en color rojo se tiene que solo hay un (1) dato de resistividad con un valor de corriente de 15A y de voltaje de 0,06668V.

Por otra parte, para la estandarización de los colores se elaboró una tabla en la que se relacionaron las variables de numero de datos (num) y resistividad (rho) (Figura 15a). A esta última variable se le calcularon estadísticos como media, mediana, moda, mínimo, máximo, desviación estándar, etc) (Figura 15b). El valor de resistividad mínimo se usó como el valor mínimo de un rango en una tabla que contenía los parámetros de: número de datos, rangos de resistividad, litología (agregada a partir de lo observado en campo y de los valores de resistividad real obtenidos del procesamiento de las TRE, y que se correlaciona con los rangos de resistividad y los colores estandarizados) y razón. Este último parámetro se utilizó como una variable definida para hacer coincidir el valor del último rango (No. 16) con el valor máximo obtenido en la estadística (654,318 ohm.m) (Figura 15c), para después generar un histograma que exhibe los rangos y las frecuencias con que esos rangos de resistividad se presentan (Figura 16).

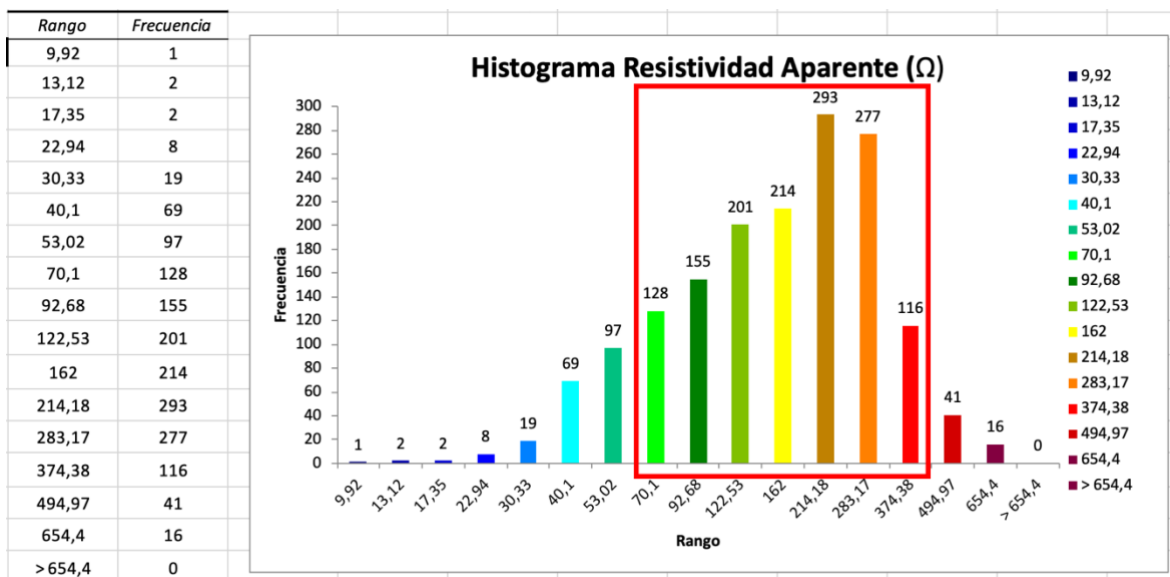
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	<b>Datos Tomografías Eléctricas Resistivas (TER)</b>							
2	<b>num</b>	<b>I</b>	<b>U</b>	<b>rho</b>		<b>Relación U y I con Resistividad</b>		
3	1	0,1	1,30375	163,834		Etiquetas de fila	Cuenta de rho	
4	2	1	7,19375	90,399		0,03818	1	
5	3	1	9,27985	116,614		15	1	
6	4	1	6,76565	85,02		0,06668	1	
7	5	1	7,2908	91,619		15	1	
8	6	1	6,94605	87,287		0,08035	1	
9	7	1	5,90778	74,239		15	1	
10	8	1	6,38045	80,179		0,10346	1	
11	9	1	4,12185	51,797		15	1	
12	10	1	5,6202	70,626		0,11214	1	

**Figura 14.** Relación entre las variables obtenidas durante la etapa de adquisición. **a)** tabla con las variables obtenidas de la adquisición de las TRE, las cuales corresponden a: número de datos (num), corriente (I), voltaje (U) y resistividad (rho). **b)** tabla que muestra la relación que hay entre cada una de las variables seleccionadas (en este caso, U, I y Resistividad).

num	rho	a)	b)	No	Rango	Litología	Razón
1	163,834			1	9,92	Limos saturados	1,322
2	90,399		Estadística Resistividad	2	13,12	Limos saturados	Ingreso en el RES
3	116,614			3	17,35	Limos saturados	
4	85,02		Media	4	22,94	Limos saturados	
5	91,619		Error típico	5	30,33	Limos saturados	
6	87,287		Mediana	6	40,1	Limos no saturados	
7	74,239		Moda	7	53,02	Limos no saturados	
8	80,179		Desviación estándar	8	70,1	Limos no saturados	
9	51,797		Varianza de la muestra	9	92,68	Arenas saturadas	
10	70,626		Curtosis	10	122,53	Arenas saturadas	
11	58,726		Coficiente de asimetría	11	162	Arenas saturadas	
12	57,97		Rango	12	214,18	Arenas no saturadas	
13	50,776		Mínimo	13	283,17	Arenas no saturadas	
14	50,174		Máximo	14	374,38	Gravas saturadas	
15	46,471		Suma	15	494,97	Gravas saturadas	
16	45,649		Cuenta	16	654,4	Gravas no saturadas	
17	46,778						
18	38,94						
19	54,611						

**Figura 15.** Proceso para la realización de histograma de rangos y frecuencias. **a)** Tabla de relación entre el número de datos (num) y la resistividad (rho), **b)** estadística descriptiva de los datos de rho y **c)** variables de número de datos para los rangos de colores de resistividad (No), rangos de resistividad, litología y la razón, la última corresponde a la variable definida para hacer coincidir el valor del último rango (No. 16, en la tabla c) con el valor máximo obtenido en la estadística (654,318, en la tabla b). Notar que el valor mínimo y la razón, en las tablas b y c respectivamente, tiene una descripción en rojo que dice “ingreso en el RES”, pues dichos valores son los que se introducen en el software RES2DINV para así establecer el intervalo de contornos para estandarizar los colores en el modelo de inversión final.





**Figura 16.** Histograma con los rangos y las frecuencias de las resistividades. Realizado como un paso para establecer la frecuencia con la cual los rangos de resistividad se presentan.

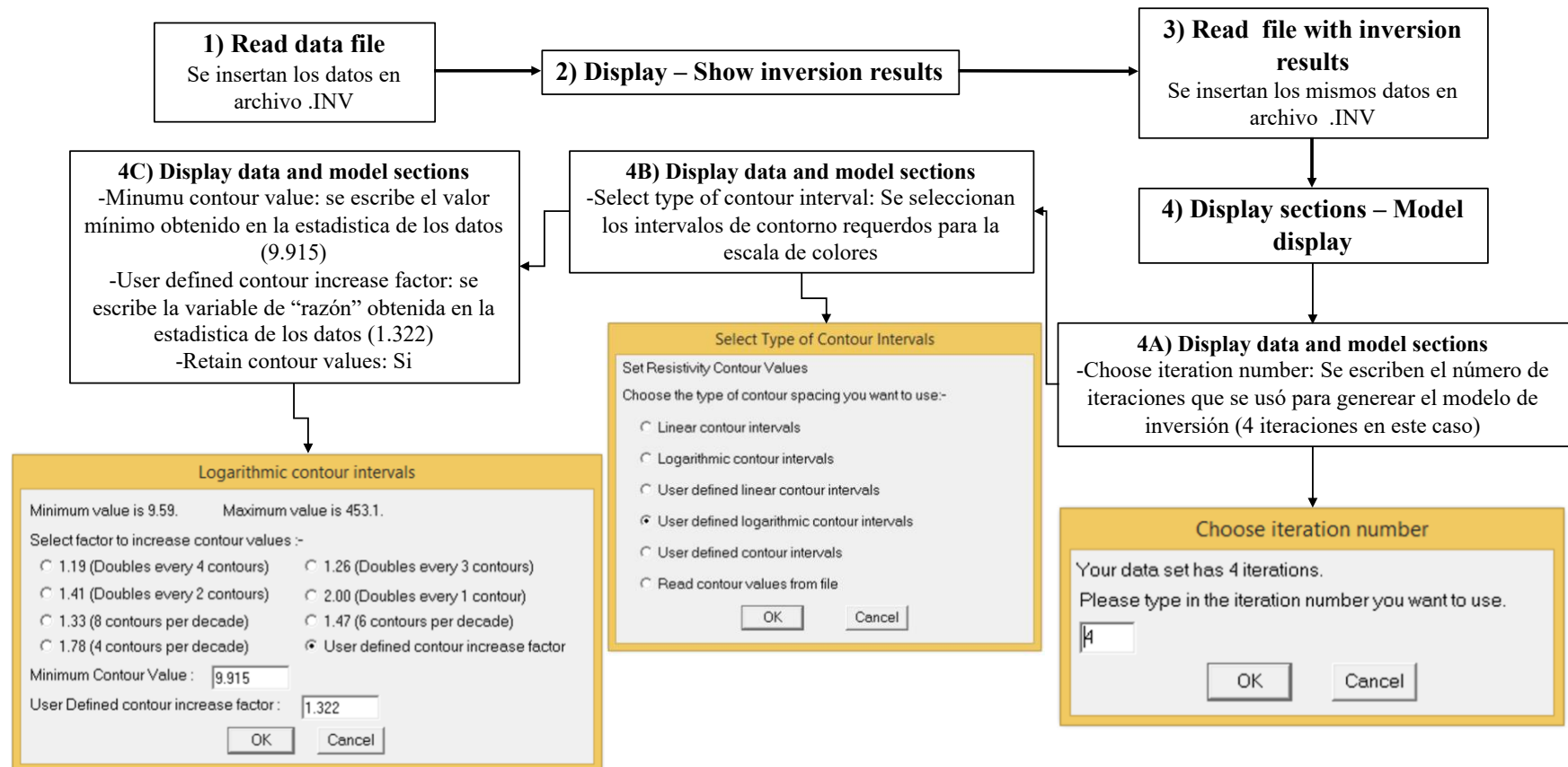
Posteriormente, se definieron los colores y las litologías (teniendo en cuenta el procesamiento de las TRE y lo observado en el trabajo de campo) para cada uno de los 16 rangos, los cuales se consignaron en una tabla con su respectiva litología (de acuerdo a lo observado en campo) y composición de color en términos de la intensidad de los colores primarios de la luz (RGB) (Figura 17). Los colores más fríos (azules y verdes) corresponden a los rangos de resistividad más bajos, mientras que los más cálidos (rojos y morados) corresponden a las resistividades más altas. Asimismo, en términos de correlación litológica, dichos colores más fríos son atribuidos a litologías finas (limos y arenas, en el levantamiento geológico de campo no se observaron arcillas y en la interpretación de las TRE tampoco) que posiblemente estén saturadas, en tanto que los colores más cálidos se atribuyen a litologías gruesas (arenas conglomeráticas, gravas y bloques) poco saturadas (debido a las variaciones resistivas sobre el mismo material). Todas estas litologías corresponden a la unidad geológica Terrazas (Qt), la cual se encuentra descrita en la Tabla 1. Características de las unidades geológicas identificadas en el área de estudio.

ESPECTRO DE COLORES						Resistividad		Correlación Litológica	
Razon	1,322					<	10	Limos Saturados	
Rango		serie	R	G	B	10	15		
<	10	1	0	0	128	15	17		
10	15	2	0	0	170	17	23		
15	17	3	0	0	211	23	30	Limos No saturadas	
17	23	4	0	0	255	30	40		
23	30	5	0	128	255	40	55		
30	40	6	0	255	255	55	70	Arenas saturadas	
40	55	7	0	192	128	70	95		
55	70	8	0	255	0	95	125		
70	95	9	0	128	0	125	160	Arenas No saturadas	
95	125	10	128	192	0	160	215		
125	160	11	255	255	0	215	280		
160	215	12	192	129	0	280	375	Gravas Saturadas	
215	280	13	255	128	0	375	490		
280	375	14	255	0	0	490	660	Gravas no saturadas	
375	490	15	211	0	0	<660			
490	660	16	132	0	64				
>660		17	96	0	96				

**Figura 17.** Tabla de composición RGB (izquierda) y tabla de colores asignados a las litologías observadas en campo (derecha). Notar que los colores más fríos (como azules y verdes) corresponden a resistividades bajas y litologías finas con alto nivel de saturación, mientras que los colores más cálidos (desde amarillo hasta morado) corresponden a resistividades más altas y litologías gruesas con bajo nivel de saturación.

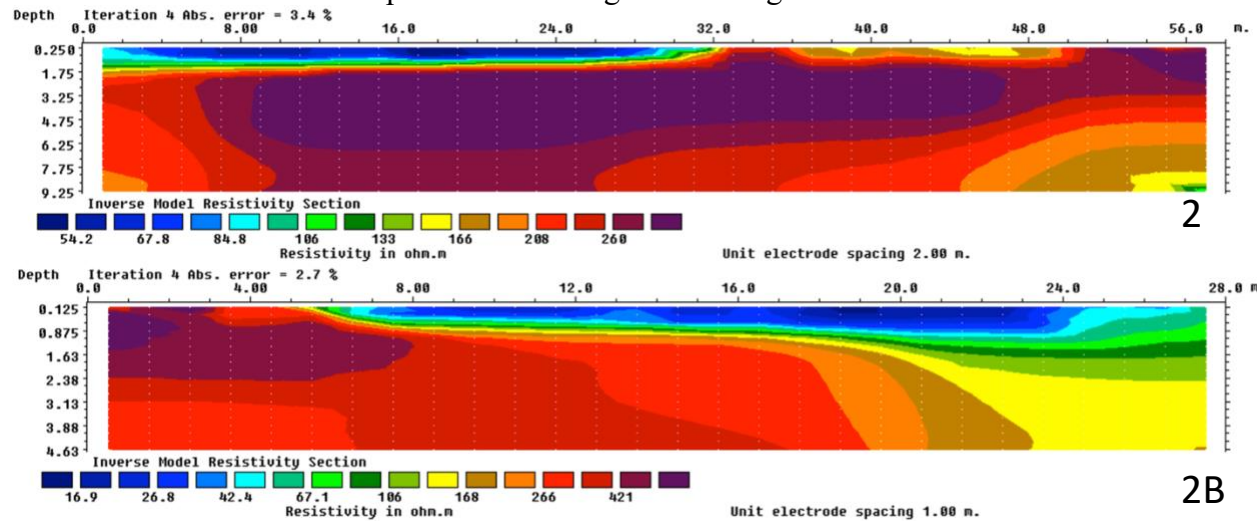
Por último, se inserta el archivo de inversión (.INV) obtenido del procesamiento de las TRE a partir del archivo .DAT en el RES2DINV para obtener un modelo de inversión con los colores estandarizados y así poder realizar una interpretación más cómoda de dicho modelo.

A continuación, se presenta un flujograma (Figura 18) con la metodología implementada para generar el modelo de inversión con los colores ya estandarizados.



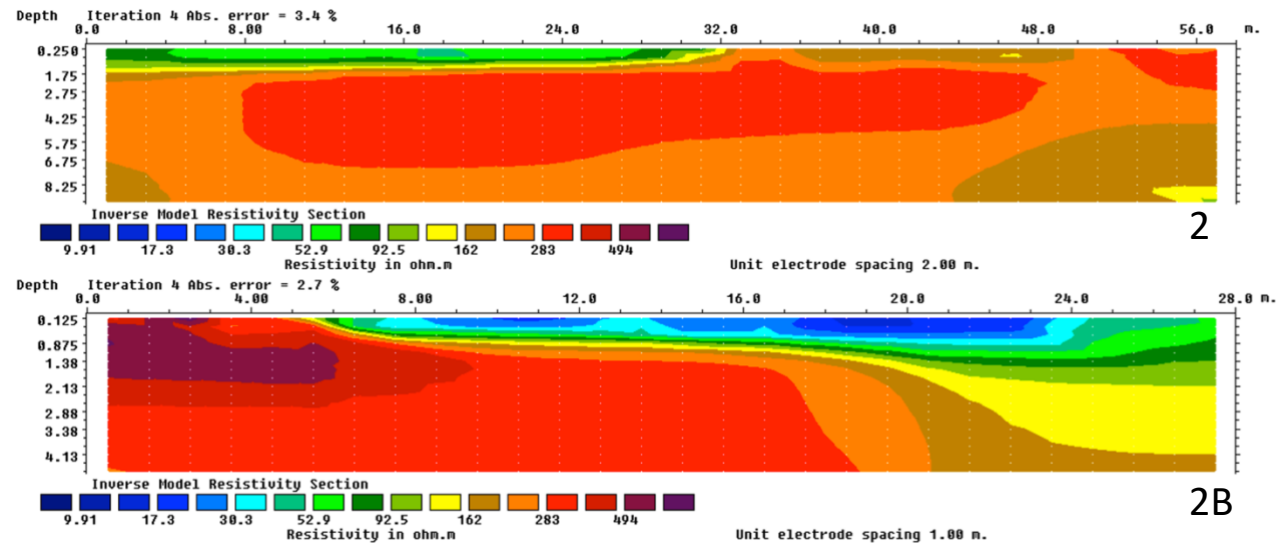
**Figura 18.** Flujograma del procesamiento para estandarizar los colores en el RES2DINV. Creación propia.

El resultado de lo anterior se presenta en las siguientes imagenes:



**Figura 19.** Modelos de inversión de TRE 2 (arriba) y 2B (abajo) antes del proceso de Ajsute de rangos de resistividad para despliegue de resultados.

**Figura 20.** Modelos de inversión de TRE 2 (arriba) y 2B (abajo) después del proceso de Ajsute de rangos de resistividad para despliegue de resultados.



La Figura 19 y Figura 20 exhiben el cambio que se presenta antes y después de ejecutar el proceso de “Ajuste de rangos de resistividad para despliegue de resultados”. Notar que en la Figura 19 (antes del proceso) los colores de los rangos de resistividad no se encuentran estandarizados y por lo tanto los valores de resistividad similares en la TRE 2 (arriba) y 2B (abajo) en esta misma figura presentan diferentes tonalidades de colores. Esto se evidencia en los colores que se muestran para los valores de resistividad de 67 ohm.m y 260 ohm.m, los cuales en la TRE 2 se encuentran marcados con tonalidades azul oscuro y rojo oscuro, respectivamente, mientras que en la TRE 2B estos valores resistivos se encuentran teñidos de color verde y rojo claro, respectivamente. Lo anterior puede ser un factor que genere malas interpretaciones acerca del modelo de inversión. Para la Figura 20 no sucede lo mismo, dado que los colores fueron estandarizados y los rangos de resistividad tienen asignadas tonalidades y litologías (basadas en lo observado en campo y la tabla de valores típicos de resistividad de UNAL, (2000), ver Tabla 7) específicas (Figura 17).

## 6. Resultados y análisis

En esta etapa se realizó la interpretación y el análisis de todas las TRE. Tal interpretación se realizó basándose en la tabla de valores típicos de resistividad, tomada de UNAL (2000) (Tabla 4).

**Tabla 4.** Valores típicos de resistividad (en ohm.m). Tomado de UNAL (2000).

Material	Resistividad
Basamento. Roca sana con diaclasas espaciadas	>10000
Basamento. Roca fracturada	1500-5000
Basamento. Roca fracturada saturada con agua corriente	100-2000
Basamento. Roca fracturada saturada con agua salada	1-100
Gruss no saturado	500-1000
Gruss saturado	40-60
Saprolito no saturado	200-500
Saprolito saturado	40-100
Gravas no saturadas	500-2000
Gravas saturadas	300-500
Arenas no saturadas	400-700
Arenas saturadas	100-200
Limos no saturadas	100-200
Limos saturadas	20-100
Limos saturadas con agua salada	5.-15
Arcillas no saturadas	20-40
Arcillas saturadas	5.-20
Arcillas saturadas con agua salada	1.-10
Andasoles secos	1000-2500
Andasoles no saturados	300-100
Andasoles saturados	30-50

Las 10 TRE realizadas en campo se tendieron con longitudes que variaban desde 30 m (perpendiculares al cauce del río) hasta 58 m (paralelas al cauce del río), y alcanzaron profundidades de investigación mínimas de 4.1 m y máximas de 8.25 m. Por otro lado, las 2 TRE obtenidas del curso de Campo II tuvieron longitudes de 47 m (perpendicular al río) y 380 m (paralela al río), alcanzando profundidades de investigación de 8.25 m y 41.3 m, respectivamente.

Es preciso aclarar que, a pesar de las diferencias de tiempo con que se realizaron las 10 TRE propias de la campaña de campo (febrero, 2019) y las 2 TRE del curso de Campo II (octubre, 2017), y teniendo en cuenta el hecho de que ambos meses contrastan ampliamente en términos de precipitación (históricamente febrero se cataloga como uno de los meses más secos en la región, mientras que octubre es uno de los meses con la mayor

precipitación, según IDEAM 2010), los días en que se hicieron las adquisiciones fueron soleados.

En aras de sintetizar la información plasmada en los resultados del presente trabajo, de las 12 Tomografías de Resistividad Eléctrica (TRE) interpretadas, sólo se presentan los resultados de 8 de ellas (2-2B, 3-3B, 5-5B y 6-6B, para mayor información ver Anexo 5 digital), ya que fueron catalogadas como tomografías tipo, debido a que mostraban unos marcados contrastes de resistividad que permitieron ver de forma clara la interacción presente entre el río y el acuífero. Adicionalmente, cabe mencionar que, debido a los contrastes de resistividad que estas TRE tipo manifestaron, se pudo evidenciar, con apoyo de la geología levantada en campo, las variaciones en la litología por la saturación, lo cual permitió tener un apreciación inicial de la interacción entre el río y el acuífero a partir de los métodos geoeléctricos.

A continuación, se presenta una breve descripción de cada uno de los pares de tomografías tipo, donde se incluyen sus características geoeléctricas y geológicas, así como su respectivo análisis. Se hace preciso aclarar nuevamente que las tomografías fueron procesadas usando el modelo extendido con el objetivo de mostrar las zonas que se extrapolan, las cuales se presentan hacia los costados inferiores del modelo final (perfil geoeléctrico). Así mismo, también se aclara que cada TRE presentada fue interpretada y delimitada por sectores para poder dar mayor entendimiento al lector. Cada sector corresponde a un conjunto de litologías (ver

Tabla 5). En aras de correlacionar la geología local de la zona con lo interpretado en las TRE se hace menester clarificar de antemano que los resultados obtenidos de estas corresponden a la unidad geológica Terrazas (Qt) (ver Tabla 1). Las otras unidades geológicas se identificaron en el trabajo de campo, en el levantamiento de la línea base.

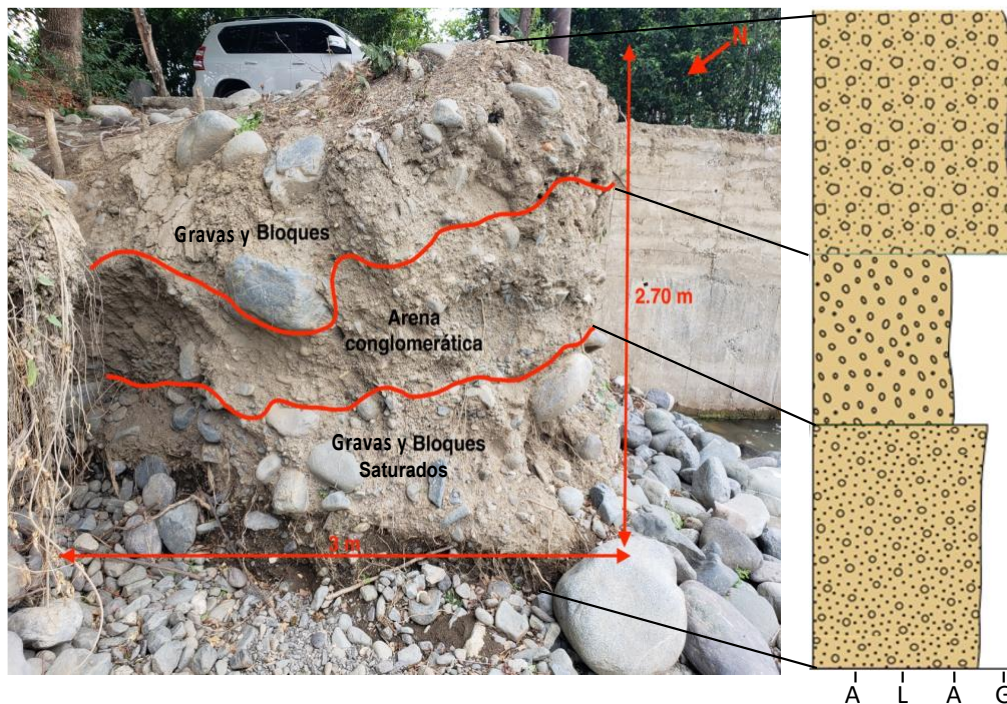


**Tabla 5.** Sectores litológicos. Creación propia.

Sector	Litología
A	Gravas y Arenas. Saturadas
B	Gravas y Arenas Conglomeráticas / Arenas y limos. Saturadas
C	Gravas y Arenas / Gravass y Bloques. No saturados
D	Gravas y Bloques saturados

### 6.1. TRE 2-2B

La zona sobre la cual se realizaron las TRE 2 y 2B corresponde a una terraza en la margen derecha del río Tonusco (en sentido contrario a la dirección del cauce del río, N-S), de aproximadamente 2.7 m de altura y con gradación intercalada entre gravas/bloques y arenas conglomeráticas, tal como se muestra en la Figura 21 (para ver la descripción detallada de la columna ir al Anexo 2, digital).



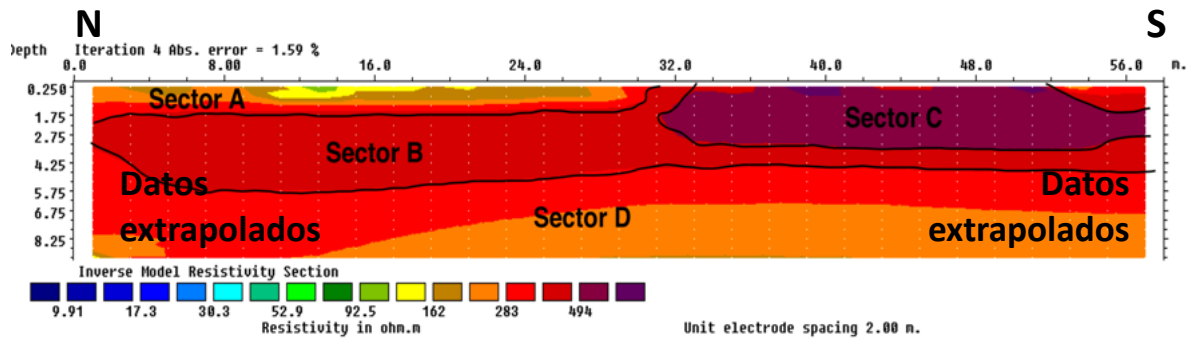
**Figura 21.** Gradación intercalada de arenas conglomeráticas y gravas saturadas. Columna 2. Fuente propia.



En ese tramo, el río Tonusco se manifestó con una profundidad aproximada de 1.8 m. La superficie de la terraza (lateralmente) se presentaba con una textura arenosa y estaba ligeramente saturada en los primeros 30 metros de distancia recorridos de forma lateral (paralela al cauce del río). Después, la terraza se mostraba menos saturada (casi seca), posiblemente por un cambio en la granulometría del material.

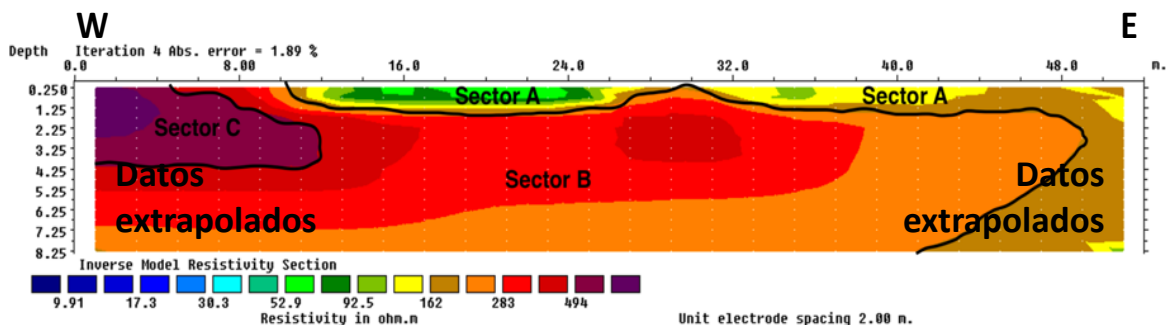
Lo mencionado anteriormente se evidencia en el aumento en los valores de resistividad en la TRE, los cuales se describen a continuación. Cabe destacar que la descripción de las TRE 2 y 2B se dan en términos tanto laterales como verticales, dependiendo de la relevancia que estas obtuvieron en el proceso de interpretación. Sobre los perfiles geoelectricos obtenidos de las TRE 2-2B (ver Figura 22 y Figura 23) se pudo observar de forma notable las variaciones resistivas que marcaban las diferentes litologías de los materiales y la saturación que estos presentaban.

El perfil geoelectrico de la TRE 2 (Figura 22), la cual se tendió de forma paralela al cauce del río Tonusco con una longitud total de 58 m (ver Tabla 3), permitió observar que en los primeros metros de profundidad había un predominio de arenas saturadas con bajo contenido de grava, con un rango de resistividades entre 92.5-283 ohm.m (sector A, acentuados en colores que van desde verde hasta rojo claro). Aumentando en profundidad, se presentaban otros materiales litológicos con rangos de resistividad absoluta que oscilaban entre 283-494 ohm.m y que correspondían a gravas y arenas conglomeráticas saturadas (Sector B, teñidas en color rojo oscuro). Después, a una profundidad aproximada de 4 m, hubo una caída en los valores de resistividad que, con apoyo de la geología levantada, se determinó eran bloques y gravas contenidos en una matriz arenosa con mayor grado de saturación, debido a la proximidad que hay al río Tonuco, pues el agua de éste termina por labrar y saturar dichas litologías (Sector C). Finalmente, a partir de 32 m de distancia en superficie (en el modelo de inversión final, ver Figura 22, extensión lateral), se observaron resistividades de casi 500 ohm.m (Sector D, color morado), las cuales fueron asignadas a gravas y bloques no saturados.



**Figura 22.** Modelo de inversión final de la TRE 2 (paralela al cauce del río) con sus respectivos sectores. Orientación del perfil geoelectrico (Azimuth): 328°.

El perfil geoelectrico de la TRE 2B (Figura 23), realizada perpendicular al río con una longitud total de 52 m (Tabla 3), otorgó una aproximación de cómo interactúa el río con las litologías de la zona. Se determinó que los primeros niveles, al igual que la TRE 2, eran arenas ligeramente saturadas con contenido de grava (92.5-162 ohm.m, sector A, marcadas con colores que varían desde verde hasta café). A una profundidad aproximada de 2 m se observaron los contrastes de resistividad que marcaban la presencia de las gravas y arenas conglomeráticas saturadas (aproximadamente 283-494 ohm.m, Sector B, delimitadas con rojo claro, rojo oscuro y anaranjado). Este sector B marca el contacto (casi directo) entre las aguas del Tonusco y la terraza, que estaba muy cerca (aproximadamente 1 m de distancia) al río. Por último, al costado W del perfil geoelectrico se destaca un sector con resistividades de mayores a 494 ohm.m (color morado) que, en apoyo con la geología levantada en la campaña de campo, se clasificó como gravas y bloques ligeramente saturados (Sector C).

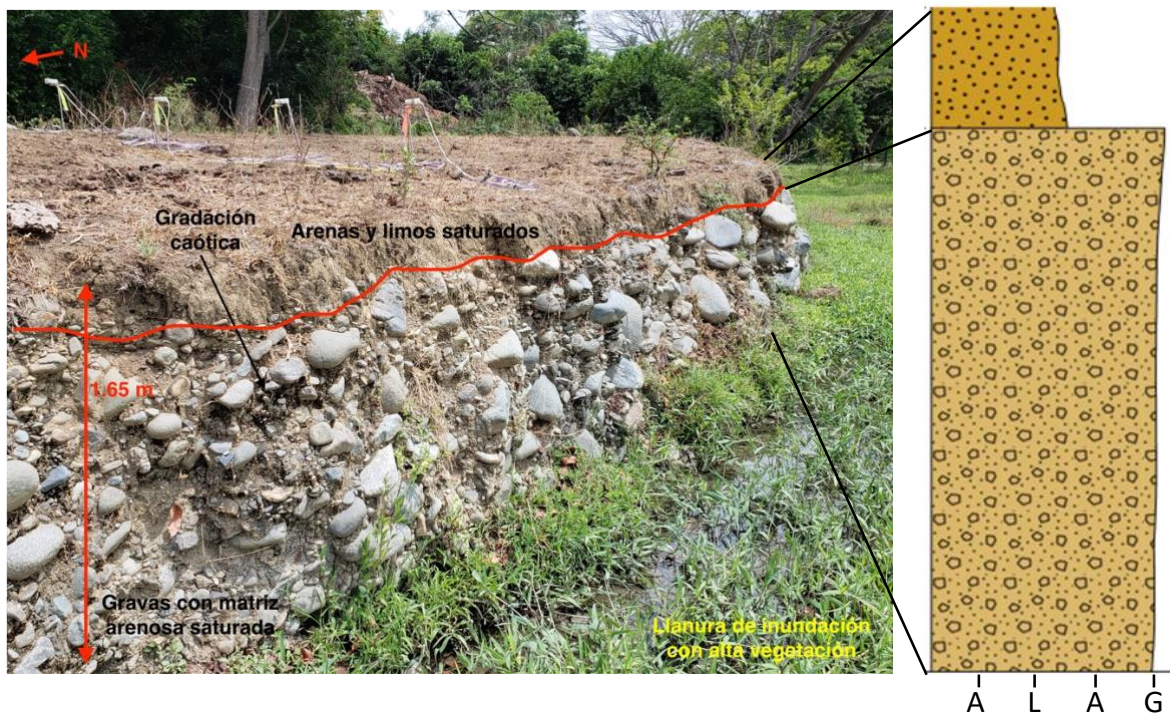


**Figura 23.** Modelo de inversión final de la TRE 2B (perpendicular al cauce del río, sobre la margen derecha) con sus respectivos sectores. Notar los cambios en la saturación de los materiales (sector B y A) debido al

contacto directo que hay entre la terraza y las aguas del río. Orientación del perfil geoelectrico (Azimuth): 079°.

## 6.2. TRE 3-3B

Este par de tomografías se realizó en la margen derecha del río Tonusco (en sentido contrario a la dirección del cauce del río, N-S), sobre una terraza de 1.65 m de altura, con una gradación caótica (para ver la descripción detallada de la columna ir al Anexo 2, digital), determinada por el gran tamaño de los clastos que la componen (Figura 24). Esta terraza se ubica en contacto directo con la llanura de inundación del río, la cual se presenta con alta vegetación y saturación (ver Figura 24, parte inferior, costado E).

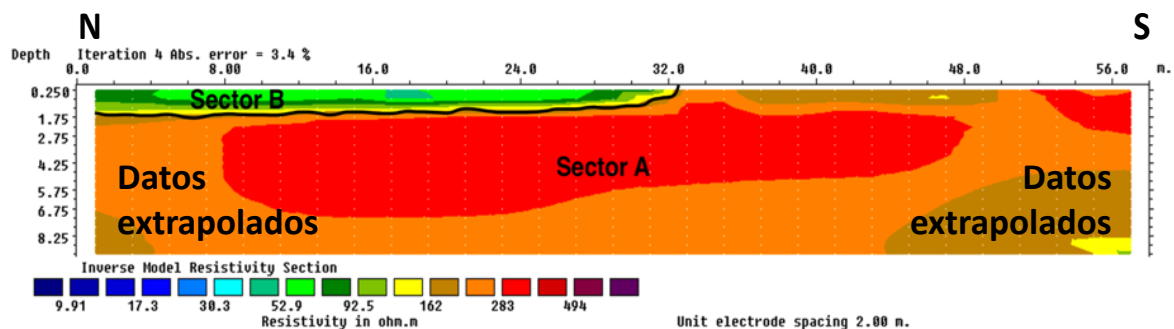


**Figura 24.** Gradación caótica de gravas con matriz arenosa saturada. En la parte inferior del afloramiento se puede observar el contacto directo que hay entre la terraza con la llanura de inundación que se encuentra altamente saturada. Columna 3-3B. Fuente propia.

La TRE 3, que se tendió paralela al cauce del río Tonusco (Figura 25) con una longitud total de 58 m (Tabla 3), exhibió unos bajos contrastes de resistividad, observándose un perfil geoelectricamente homogéneo. En la parte inferior del perfil (Sector A, de colores amarillo, anaranjado y rojo) el material predominante son gravas con matriz arenosa

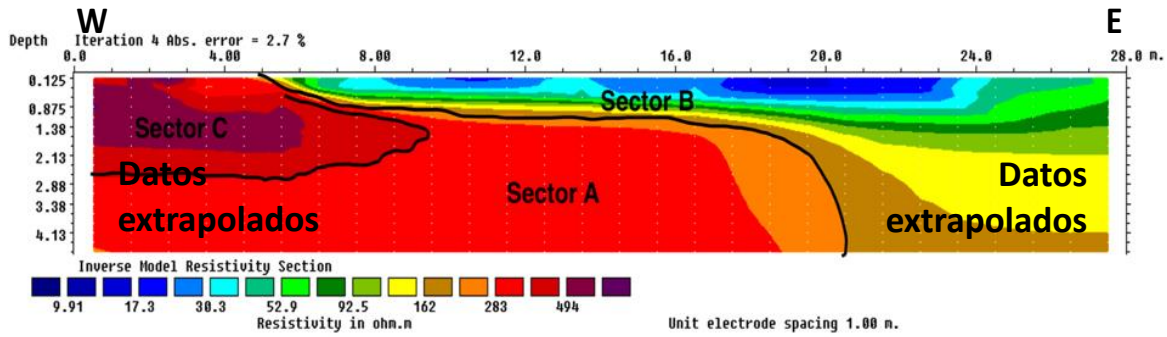
saturada (162-283 ohm.m), mientras que la parte superior (Sector B, de tonalidades verdosas) se clasificó como arenas y limos saturados ( 52.9-283 ohm.m).

La TRE 3B, tendida perpendicular al cauce del Tonusco (Figura 26) con una longitud total de 28 m (Tabla 3), de igual forma evidenció un perfil con un medio geoelectricamente homogéneo, pero con variaciones en el contenido de saturación de los materiales, como las arenas y los limos saturados (17.3-162 ohm.m, Sector B), y manifestando la presencia de gravas con matriz arenosa saturadas (162-494 ohm.m, Sector A), lo que genera claros contrastes en los valores de resistividad. Ya que esta TRE se tendió en la parte más cercana a la llanura de inundación (primer electrodo ubicado sobre la terraza a 50 cm de la llanura de inundación), en el perfil generado se pudo apreciar que al costado W, a medida que se profundiza, hay una disminución en la resistividad, lo que indica un incremento en la saturación del material, debido a que se encuentra en contacto directo con el agua del río (Figura 24). Finalmente, en la parte superior, al costado W del modelo, los valores de resistividad más altos observados (>494 ohm.m, Sector C) permitieron corroborar la presencia de gravas y arenas conglomeráticas no saturadas que se evidenciaron en el levantamiento de la columna sedimentaria (ver Figura 24).



**Figura 25.** Modelo de inversión final de la TRE 3 (paralela al cauce del río) con sus respectivos sectores.  
Orientación del perfil geoelectrico (Azimuth): 330°.





**Figura 26.** Modelo de inversión final de la TRE 3B (perpendicular al cauce del río) con sus respectivos sectores. Orientación del perfil geoelectrico (Azimuth): 079°.

### 6.3. TRE 5-5B

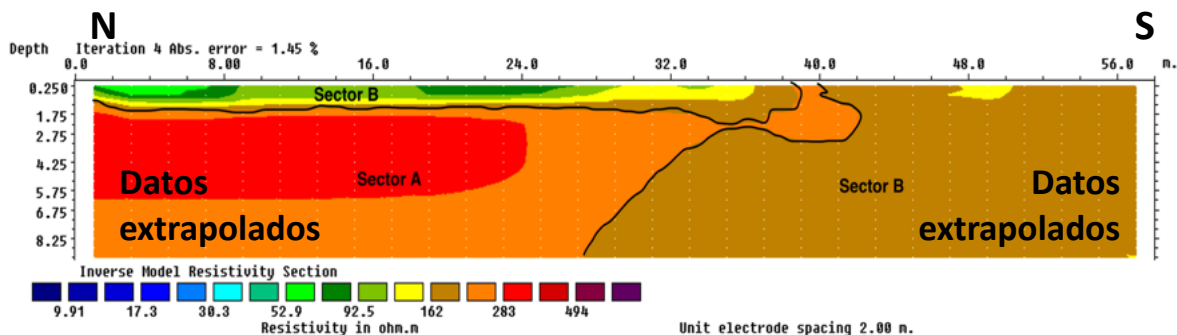
El sitio donde se llevó a cabo la geofísica corresponde a una terraza de 2.30 m de altura, ubicada sobre la margen izquierda del río Tonusco (en sentido contrario a la dirección del cauce del río, N-S). La superficie se encontraba ligeramente saturada, lo cual se evidenció por la suavidad del material que conformaba dicha superficie (ver Figura 27). Adicionalmente, se observó que la terraza se encuentra en contacto directo con las aguas del río, el cual, en ese tramo, presentaba una profundidad aproximada de 4 m.



**Figura 27.** Evidencia de suelo saturado y de superficie donde se realizó la TRE 5-5B. Columna 5-5B. Fuente propia.

Los perfiles geoelectricos obtenidos del área, principalmente el 5B (Figura 29), destacan los cambios en la saturación del material debido a la interacción río-acuífero presente. Esto se logró debido a que las TRE se tendieron en la parte más cercana al cauce del río: para la TRE 5B (Figura 28), perpendicular, electrodo ubicado sobre la terraza a 1 m de distancia (lateral) del cauce del río.

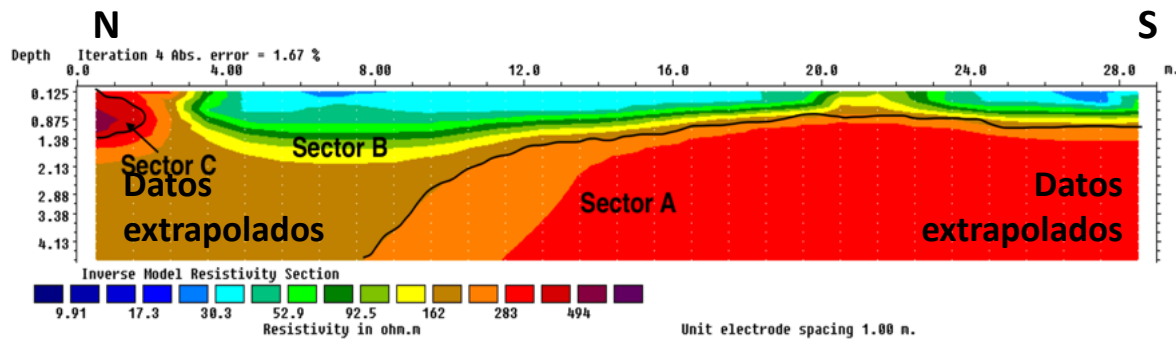
TRE 5, tendida paralela al cauce del Tonusco (Figura 28), y con una longitud total de 58 m (Tabla 3), presentó un perfil geoelectrico en el cual se identificaron dos sectores con variaciones en la resistividad. El primer sector (sector B, de tonalidades verde claro a café) presentó rangos de resistividad entre 52.9 y 162 ohm.m, y se clasificó como limos y arenas saturadas. El segundo (sector A, con tonalidades de anaranjado y rojo), que se encontraba a mayor profundidad, presentó rangos de resistividad mayores (162-283 ohm.m) pero, correspondían a litologías de un tamaño de grano mayor, más precisamente arenas conglomeráticas y gravas saturadas.



**Figura 28.** Modelo de inversión final de la TRE 5 (paralela al cauce del río) con sus respectivos sectores. Orientación del perfil geoelectrico (Azimuth): 322°.

De la TRE 5B, realizada perpendicular al Tonusco (Figura 29) y que contaba con una longitud total de 29 m (Tabla 3), se obtuvo un perfil geoelectrico con mayor variación en las resistividades que el anterior, pero del que se pudieron clasificar los mismos dos sectores. El primero (Sector B, tonalidades azul claro hasta café) está compuesto por limos y arenas saturadas con rangos resistivos entre 30.3 y 162 ohm.m, mientras que el segundo (Sector A, con color anaranjado y rojo), en el que ya se notan más los contrastes dada la forma en que se tendió la línea, permitió clasificar con mayor certeza al material litológico como gravas y arenas conglomeráticas saturadas (162-283 ohm.m). Además, se destaca la variación en el contraste de resistividades de E a W (en el modelo geoelectrico), lo que deja

en evidencia la marcada interacción que hay por el contacto directo entre las unidades geológicas con el río Tonusco.



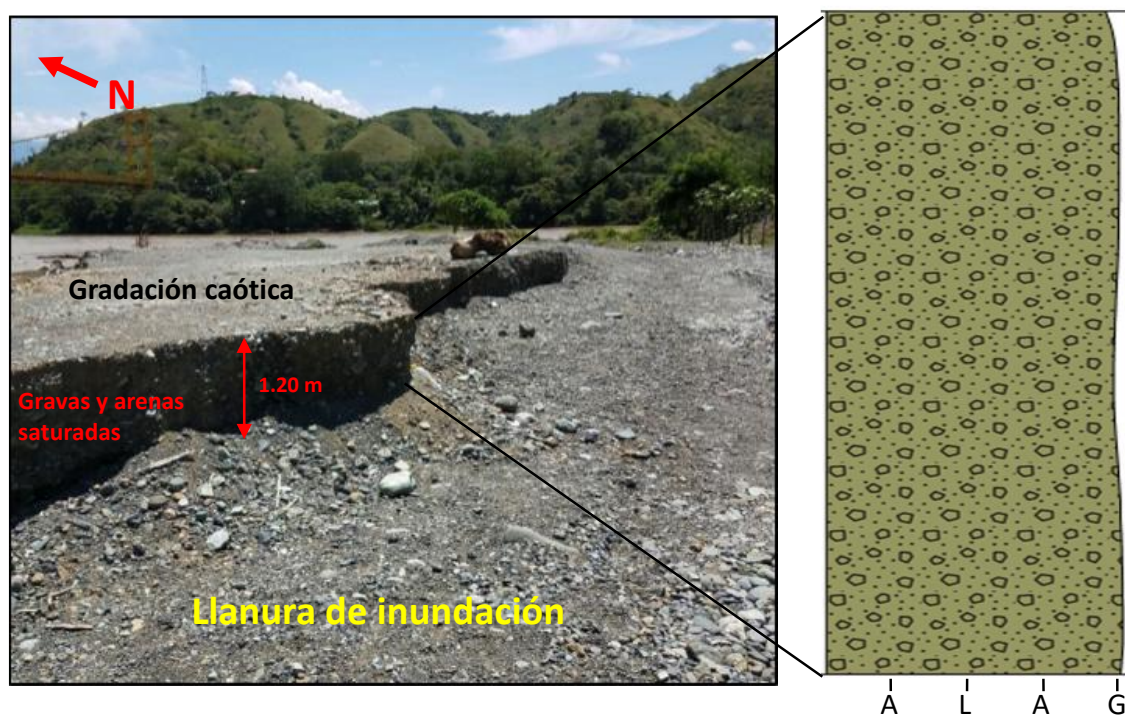
**Figura 29.** Modelo de inversión final de la TRE 5B (perpendicular al cauce del río, sobre la margen izquierda) con sus respectivos sectores. Orientación del perfil geoelectrico (Azimuth): 048°.

Es importante mencionar que en la parte superior, hacia el costado W del modelo, se presentaron resistividades mayores (en el rango de 283 a 494 ohm.m, con tonalidades rojo oscuro a marrón) que se debían a la ocurrencia de gravas y arenas no saturadas (Sector C), las cuales se encontraban en la parte superior de la terraza (más lejos del río) y estaban cubiertas por árboles que impedían que la precipitación las saturara. Esta última interpretación no es del todo segura debido al uso del modelo extendido, que extrapoló los valores de resistividad para generar la extensión de este.



#### 6.4. TRE 6-6B

El par de tomografías 6 y 6B fue adquirido por el grupo de geofísica durante el curso de Geología de Campo II en el segundo semestre de 2017, el día 12 de octubre. Estas tomografías se realizaron sobre la margen izquierda del río Tonusco (en sentido contrario a la dirección del cauce del río, N-S), más precisamente en la llanura de inundación del río (TRE 6B, perpendicular al cauce del río) (Figura 30) y en una terraza próxima a la llanura de inundación con muy baja saturación en superficie (TRE 6, paralela al cauce del río) (Figura 31).



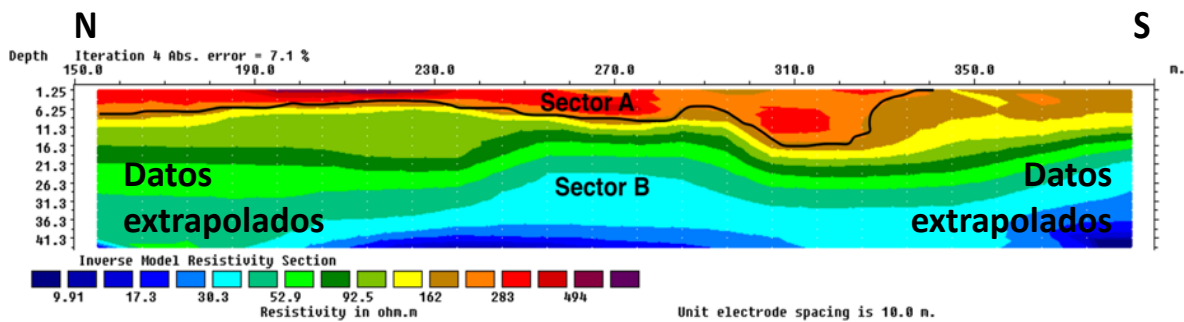
**Figura 30.** Gradación caótica de gravas y arenas saturadas. Columna 6. Fuente propia.

De la TRE 6 (Figura 32), tendida paralela al cauce del río y que contaba con una longitud total de 380 m (Tabla 3), se obtuvo un perfil con una mayor variación en la resistividad, debido a que alcanzó una mayor profundidad de investigación (41.3 m aproximadamente). Los materiales más someros se clasificaron como arenas y gravas saturadas, con rangos entre 283->494 ohm.m (rojo, morado y anaranjado, Sector A), mientras que los materiales que se encontraban a más profundidad correspondían a litologías más finas y con mayor grado de saturación, como intercalación entre arenas y limos, con rangos entre 17.3-162 ohm.m (tonalidades desde azul hasta café, sector B).





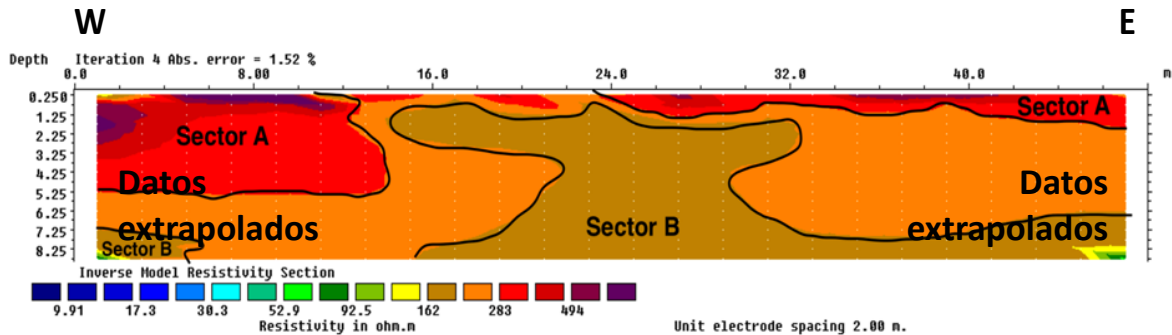
**Figura 31.** Gradación granocreciente de base a techo entre gravas saturadas y arenas intercaladas con limos, determinada con ayuda de la geología levantada en campo y la interpretación geoelectrica. Imagen tomada y modificada de Amaya et al. (2017).



**Figura 32.** Modelo de inversión final de la TRE 6 (paralela al cauce del río) con sus respectivos sectores. Orientación del perfil geoelectrico (Azimuth): 335°.

El perfil geoelectrico generado a partir de la TRE 6B (Figura 33), que contaba con una longitud total de 47 m (Tabla 3) y que alcanzó una profundidad de investigación máxima de 8.25 m, permitió determinar que en la parte más somera de la zona se presentaban gravas y arenas saturadas, con valores de resistividad que oscilaban entre 283->494 ohm.m (colores rojo y morado, Sector A). A medida que aumenta la profundidad, esos valores de resistividad caen desde 283 a 162 ohm.m (Sector B), indicando una posible mayor

saturación de material en la zona, principalmente arena que transporta el río. Esto último se debe a la cercanía del nivel freático (aproximadamente 5 a 6 m), pues esta línea se tendió sobre la llanura de inundación del río.



**Figura 33.** Modelo de inversión final de la TRE 6B (perpendicular al cauce del río) con sus respectivos sectores. Orientación del perfil geoelectrico (Azimuth): 249°.

Una vez interpretadas todas las TRE, también se buscó identificar un patrón de variación granulométrico notable que permitiera determinar si el posible grado de saturación dependía de estas variaciones granulométricas. Sin embargo, debido a la poca extensión de la zona esto no fue posible, ya que los resultados de la interpretación de las TRE mostraron que las terrazas donde el método se implementó comprendían gradación caótica e intercalada entre arenas, gravas y limos sin poder apreciar una tendencia notable hacia la desembocadura del río Tonusco en el Cauca.

Teniendo en cuenta la litología interpretada se puede establecer que estas terrazas pueden presentar distintos valores de conductancia debido a los diferentes materiales que las componen, haciendo que en algunos tramos de la zona de estudio haya una mayor facilidad del flujo y almacenamiento de agua a través de dichos materiales, que lo más probable es que sean arenas y gravas (hidraulicamente más conductivos por ser más porosos).

De lo anterior, es posible declarar que por la alta cantidad de materiales gruesos (principalmente gravas) que se presentaban en la zona donde se realizaron las TRE 6 y B, (sobre la desembocadura del río Tonusco en el Cauca) la conductancia en esa zona sea alta, dado que el material es grueso y, por tanto, más poroso, lo que facilita el flujo y almacenamiento de agua a través de este. Para una obtención de resultados más contrastantes, se hace necesario abarcar un área de estudio mayor.

## 6.5. Medición del nivel piezométrico

En el presente numeral se muestran los aljibes (7 en total, 4 sobre la margen derecha y 3 sobre la izquierda del río Tonusco, en sentido contrario a la dirección del cauce del río, que va norte a sur) ubicados sobre las terrazas, a los cuales se les midió el nivel freático, el día miércoles 27 de marzo del 2019. La Tabla 6 presenta los aljibes con sus respectivas características.

Las mediciones del nivel freático realizadas a partir de la utilización de la sonda de nivel de agua registraron profundidades que variaban, en la margen izquierda del río Tonusco, entre 4.69 m cerca de su desembocadura en el río Cauca hasta aproximadamente 20 m en la terraza donde se realizó la TRE 5-5B (Figura 8) cerca de la cabecera municipal de Santa Fe de Antioquia. En la margen derecha, la profundidad a la cual se encontraba el nivel freático era mayor, variando desde 15 hasta 25 m a lo largo de dicha margen dentro del área de estudio. Así mismo, las alturas piezométricas registraron valores cambiantes, para la margen derecha del río Tonusco, entre 547.6 m.s.n.m., en el tramo más distal de su desembocadura en el río Cauca, y 496.5 m.s.n.m. en el tramo más cercano a la desembocadura en el Cauca. Para la margen izquierda, se obtuvieron valores de 526.4 m.s.n.m., en el tramo más alejado de la desembocadura del Tonusco en el Cauca, y 483.3 m.s.n.m. en el tramo más cercano de la desembocadura en el Cauca.

**Tabla 6.** Características de los aljibes medidos en el área de estudio.

Nº Aljibe	Norte (m)	Este (m)	Elevación (msnm)	Prof. total (m)	Nivel freático (m)	Altura piezométrica (m.s.n.m)
1*	01216894	01137541	564	30	16.4	547.6
2*	01215768	01138249	542	20	14.7	527.3
3*	01214759	01138914	529	25	23.2	505.8
4 <sup>+</sup>	01212456	01138710	488	12	4.69	483.3
5 <sup>+</sup>	01213765	01138603	520	30	19.3	500.7
6 <sup>+</sup>	01216053	01137921	540	18	13.6	526.4
7*	01212797	01139258	521	30	24.5	496.5

Sistema de Coordenadas Magna Colombia Oeste

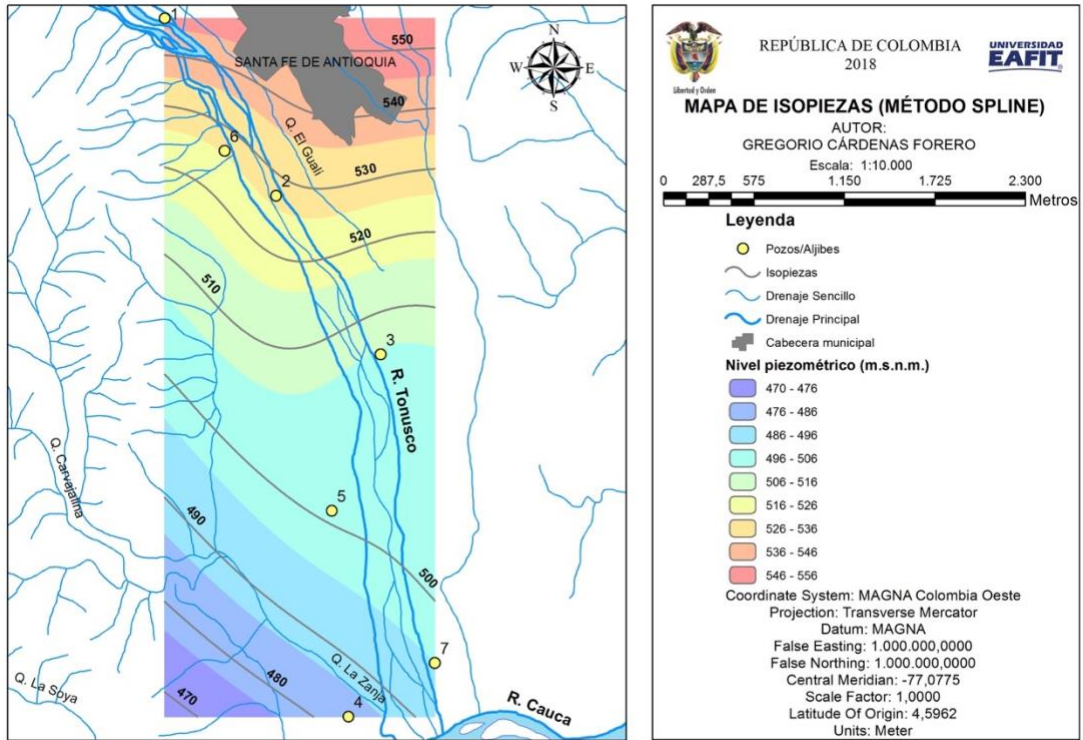
\* Aljibes localizados sobre la margen derecha del río Tonusco

+ Aljibes localizados sobre la margen izquierda.

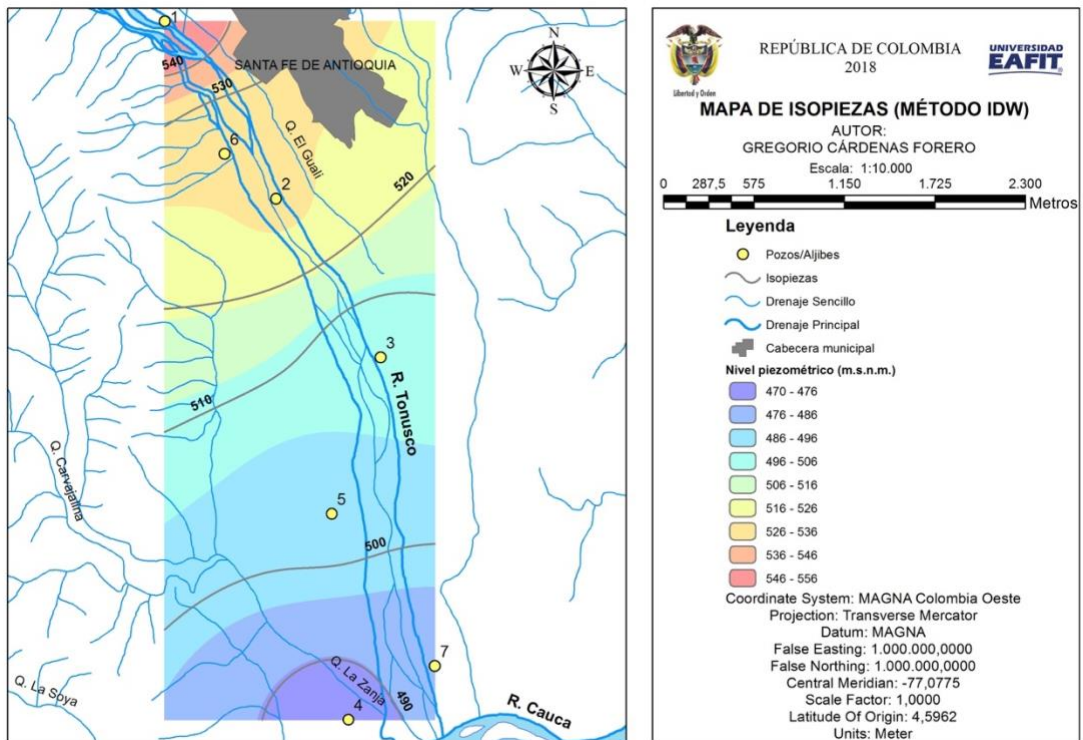
Con base en las alturas piezométricas obtenidas a partir de la medición de aljibes en la zona de estudio se elaboró un mapa de isopiezas (Figura 34), el cual es una herramienta útil para el estudio hidrogeológico, dado que a partir de él es posible determinar direcciones de

flujo, zonas de recarga, entre otros (Corantioquia-UNAL 2004). Se hace crucial aclarar que los siete puntos (alturas piezométricas de los aljibes) con los que se elaboró el mapa de isopiezas no son una muestra representativa como para llegar a establecer una conclusión a partir de este. Así mismo, este mapa se establece, en el presente trabajo, como una herramienta, de ejercicio académico, para poder explicar cómo se logra determinar, de forma inicial y aproximada, el comportamiento de la interacción río-acuífero en términos de ganancia o pérdida de flujo, además de apoyar a la geoelectrica para poder identificar el grado de interacción (mayor o menor) que hay en ambas márgenes del río tonusco.

Para la elaboración del mapa se buscó establecer qué método de interpolación era el más adecuado, para lo cual se hicieron tres mapas con tres métodos representativos: Spline, IDW y Kriging (Figura 34, Figura 35 y Figura 36, respectivamente). El primero estima valores usando una función matemática que minimiza la curvatura general de la superficie, lo que resulta en una superficie suave que pasa exactamente por los puntos de entrada, este método es ideal para generar superficies que varían levemente, como la elevación, la altura de las tablas de agua o las concentraciones de contaminación. El segundo método determina los valores de celda a través de una combinación ponderada linealmente de un conjunto de puntos de muestra. La ponderación es una función de la distancia inversa. La superficie que se interpola debe ser la de una variable dependiente de la ubicación. Finalmente, el tercero genera una superficie estimada a partir de un conjunto de puntos dispersados con valores  $z$ . Los dos primero métodos se conocen como métodos determinísticos de interpolación, porque están basados directamente en los valores medidos o en fórmulas matemáticas específicas que determinan la suavidad de la superficie resultante. El tercero, Kriging, es un método de interpolación que consta de métodos geoestadísticos, y está basado en modelos estadísticos que incluyen la autocorrelación, es decir, las relaciones estadísticas entre los puntos medidos (Esri, 2018). Los tres mapas se realizaron con un tamaño de celda de 6,868 píxeles.

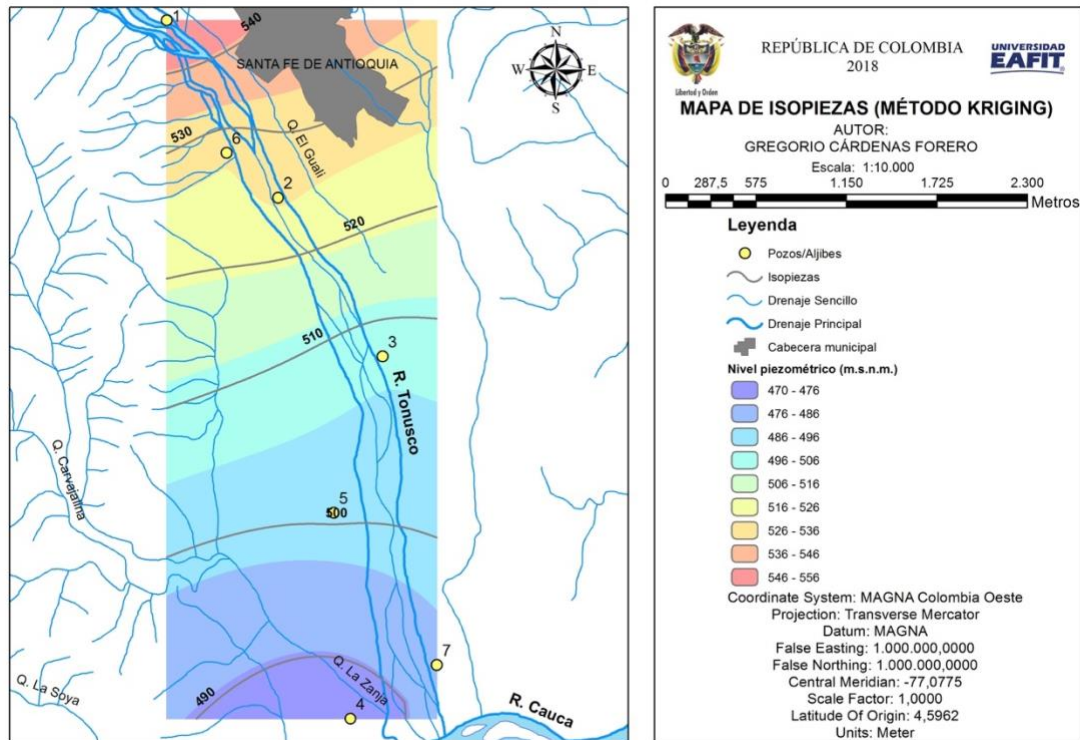


**Figura 34.** Mapa de isopiezas para la zona de estudio a partir del método Spline. Creación propia.



**Figura 35.** Mapa de isopiezas para la zona de estudio a partir del método IDW. Creación propia.





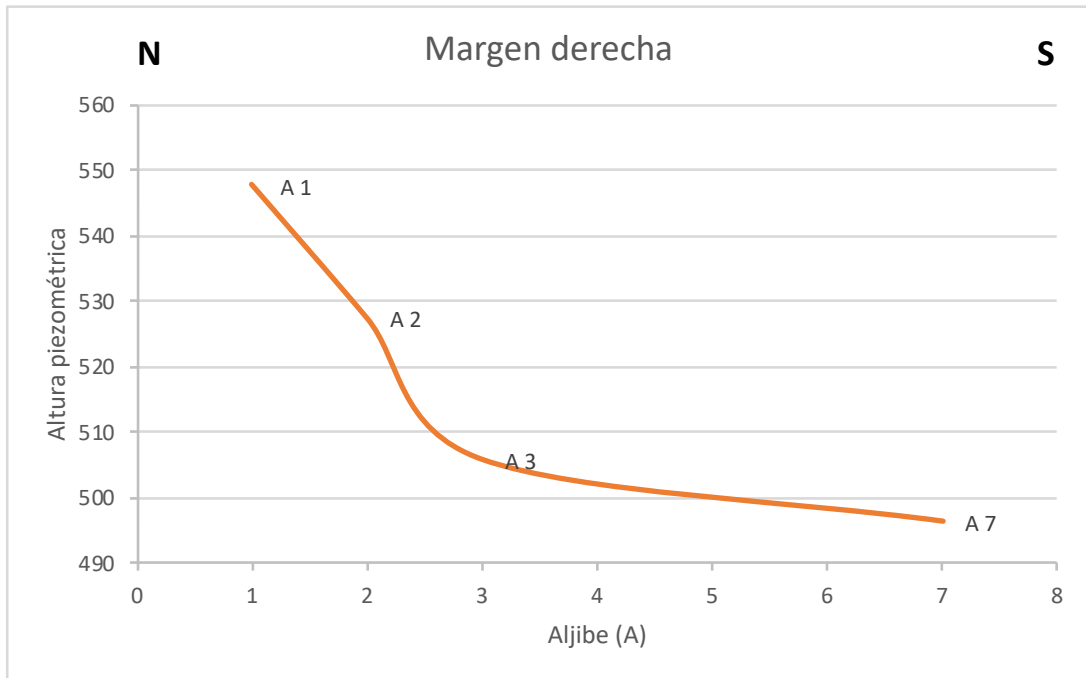
**Figura 36.** Mapa de isopiezas para la zona de estudio a partir del método Kriging. Creación propia.

Haciendo una comparación entre los tres mapas de isopiezas previamente mostrados, se pudo determinar que el mapa que mejor representa la dirección de flujo, teniendo en cuenta los niveles piezométricos de los aljibes (1 a 7, ver Tabla 6), fue el de IDW, pues este mapa exhibe las isopiezas (líneas grises, ver Figura 35) y los contornos (colores) con direcciones acorde a la dirección del cauce del río. Además, este método, a diferencia del Kriging, se basa directamente en los valores medidos (los aljibes) y no requiere de un análisis exploratorio riguroso basado en variogramas, lo cual representa un alto grado de complejidad teniendo en cuenta el alcance del presente proyecto. Comparando con el método Spline, sobresale porque la variable que se interpoló (niveles piezométricos) era dependiente de la ubicación (cordenadas) y no estaba basada en una función matemática que minimiza la curvatura general de la superficie, además de que el método de interpolación Spline es utilizado para variables que presentan un comportamiento cuadrático, la variable evaluada (relacionada estrechamente con el agua) presenta un comportamiento lineal ya que responde al comportamiento de un gradiente hidráulico donde lo que se espera es que el flujo de agua no presente grandes variaciones (control estructural que modifica el cauce) (Esri, 2018).

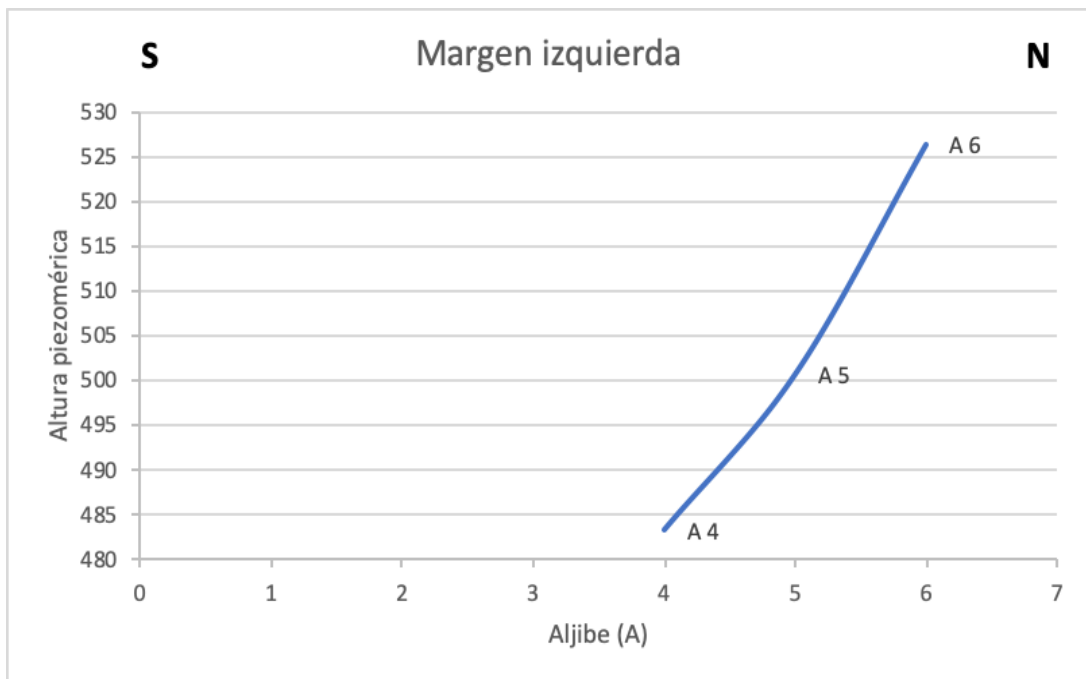
A pesar de que los mapas presentan un alto grado de incertidumbre debido a que los puntos con los que se realizaron no son una muestra representativa (se necesitan mínimo 30) para establecer una sólida conclusión, de su análisis se podría determinar (a modo de dar a entender al lector el tipo de conclusiones que de estos mapas se pueden obtener) que en los tres mapas se presenta un comportamiento similar, en donde el nivel piezométrico se encuentra más alto en la parte más distal de la desembocadura del río Tonusco en el Cauca, mientras que en la parte más cercana a la desembocadura el nivel se encuentra más bajo. Esto posiciona al Cauca como una importante fuente de recarga para el acuífero en el Sector del Tonusco, aclarando que esto se da sólo en aquellos meses donde se invierta el flujo subterráneo y el gradiente hidráulico lo permita. Lo mencionado anteriormente se puede llegar a declarar con mayor criterio siempre que se hayan realizado mediciones del nivel piezométrico a través del tiempo.

De igual forma, y teniendo en cuenta lo aclarado anteriormente (7 muestras no son representativas) en la parte superior del mapa (ver Figura 34), se evidencia que las isopiezas apuntan en dirección hacia abajo donde se cruzan/cortan con la corriente del río Tonusco, lo que, según Winter et al., (1998) (ver Figura 1), es sinónimo de pérdida de flujo. En la parte inferior del mapa, cerca a la desembocadura en el río Cauca, se nota un comportamiento diferente, dado que las isopiezas apuntan en dirección hacia arriba donde se cruzan con la corriente del Tonusco, indicando un posible comportamiento ganador del río en ese tramo. Nuevamente se aclara que mejores resultados se pueden llegar a obtener implementando más datos de muestreo.

Adicionalmente, se realizaron perfiles piezométricos de ambas márgenes del río, a partir de las alturas piezométricas obtenidas de las mediciones de los aljibes, para poder determinar la tendencia de la altura piezométrica a medida que hay mayor proximidad del río Tonusco con el río Cauca (desembocadura) (Figura 37 y Figura 38).



**Figura 37.** Perfil piezométrico para la margen derecha del río Tonusco. Creación propia.



**Figura 38.** Perfil piezométrico para la margen izquierda del río Tonusco. Creación propia.

De los perfiles piezométricos previamente mostrados se puede afirmar que presentan una tendencia decreciente de la altura piezométrica hacia el sur, que es la parte más cercana a la desembocadura del río Tonusco en el río Cauca. Esto, como ya se había mencionado previamente, establecería la presencia del río Cauca como una variable influyente sobre los



niveles piezométricos y por tanto sobre la recarga del acuífero en el sector Tonusco. se hace necesario aclarar, de forma reiterada, que para la obtención de resultados con mayor peso es idóneo realizar un mayor muestreo de pozos.

## 7. Discusión

La finalidad de este trabajo de grado era aproximarse al entendimiento de la interacción río-acuífero en el sector del río Tonusco a partir de los métodos geoelectricos, más específicamente de las Tomografías de Resistividad Eléctrica (TRE). Adicionalmente, se buscó determinar cuáles son las zonas donde se presentaba una mayor interacción río-acuífero debido a la variación de resistividades, por la saturación en los materiales geológicos y por el parámetro de conductancia hidraulica que estos materiales podrían tener debido a su granulometría. Todo esto se hace con miras a lograr, a futuro, un manejo sostenible del recurso hídrico en Santa Fe de Antioquia, teniendo en cuenta los problemas por desabastecimiento que se presentan (Corantioquia-SHI 2017).

La saturación de los materiales geológicos de las terrazas del río Tonusco desempeña un rol importante en las variaciones resistivas de la litología de estos materiales. Dichas variaciones por saturación, dieron una idea, pero no permitieron establecer la interacción que hay entre el río y el acuífero. Esto se explica por la poca información que otorgaron los modelos de inversión final y las columnas geológicas concordantes con estos modelos, las cuales se obtuvieron a partir de levantamiento geológico e interpretación geoelectrica. Hecho contrario hubiera sido si se hubiera implementado una TRE 4D, pues esta herramienta permite observar, caracterizar y evaluar los aspectos dinamicos de un pasivo con el tiempo (López, 2006) (p.e: un río interactuando con un sistema de agua subterránea). Esto le permite a la TRE 4D apreciar direcciones de flujo, medir valores de transmisibilidad del acuífero, y por supuesto, ver la interacción que hay entre un río y un acuífero (ALH Geofísica, 2007). Para llegar a esto último se hace necesario hacer múltiples mediciones en diferentes periodos del año hidrológico. Para el caso de la presente zona, Santa Fe de Antioquia, las mediciones tendrían que realizarse en el intervalo de tiempo que hay entre diciembre y marzo, correspondiente al período seco, y dentro del intervalo de tiempo entre el mes de abril hasta noviembre, lo cual corresponde al periodo de mayores precipitaciones. De forma agregada, lo anterior ayuda a concluir con mayor peso a cerca del parámetro físico de la conductancia, pues se tendría mayor información sobre la dirección del flujo a través de los materiales geológicos que componen al acuífero y, por tanto, no solo se

tendría que apoyar en el tipo de material para establecer una conductancia aproximada de los materiales del depósito.

Las variaciones en los contrastes de resistividad se deben, no solo a los cambios en la litología de un material, sino también al grado de saturación que estos presentan, pues la inclusión de fluidos genera cambios en la respuesta geoelectrica de un material geológico, sin la necesidad de que corresponda a otro tipo de litología. En términos teóricos, esto se debe al hecho de que la conductividad eléctrica, y la resistividad (inversamente proporcionales) tienen dos componentes: la conductividad electrónica, que se debe al movimiento de electrones en la masa del material, y la conductividad electrolítica, dada por el movimiento de iones en los fluidos que llenan los intersticios del geomaterial. Esta última puede predominar, de modo que un material con elevada resistividad puede presentar una muy baja resistividad si se encuentra saturada con fluidos cargados de sales (Arias et al., 2012). Adicionalmente, otros factores como meteorización, proximidad al cauce, entre otros, permiten establecer, de forma inicial, el grado de interacción entre un río y el acuífero en un determinado sector, aunque no sea posible establecer relaciones significativas entre valores de resistividad y propiedades geomecánicas (Arias et al., 2012).

En el presente proyecto las variaciones de resistividad que dan una idea de los cambios en la respuesta geoelectrica de los materiales geológicos, debido a la saturación, dieron una idea respecto a la interacción que hay entre las terrazas de la zona y el río Tonusco. En la interpretación de los perfiles geoelectricos, los materiales geológicos con litologías de grano grueso, como arenas y gravas saturadas, presentaron valores de resistividad que coincidieron ampliamente con aquellos presentados por UNAL (2000) (ver Tabla 7) en su Tabla Teórica de Resistividad (entre 100-500 ohm.m).

**Tabla 7.** Valores típicos de resistividad (en ohm.m). Tomado de UNAL (2000).

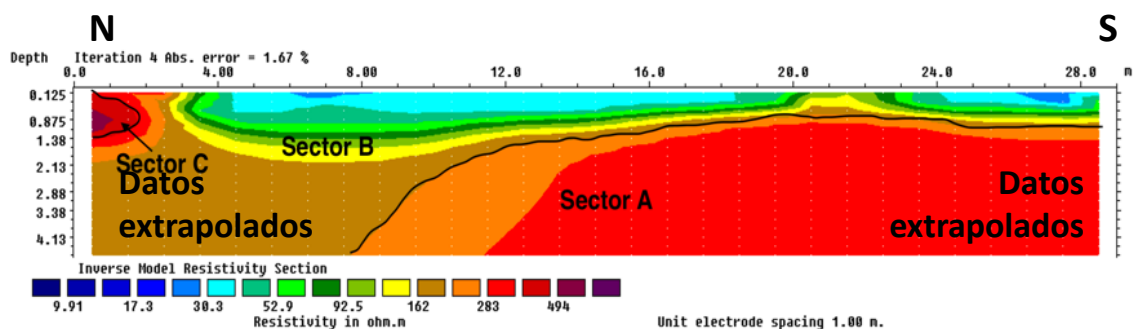
Material	Resistividad
Basamento. Roca sana con diaclasas espaciadas	>10000
Basamento. Roca fracturada	1500-5000
Basamento. Roca fracturada saturada con agua corriente	100-2000
Basamento. Roca fracturada saturada con agua salada	1-100
Gruss no saturado	500-1000
Gruss saturado	40-60
Saprolito no saturado	200-500
Saprolito saturado	40-100
Gravas no saturadas	500-2000
Gravas saturadas	300-500
Arenas no saturadas	400-700
Arenas saturadas	100-200
Limos no saturadas	100-200
Limos saturadas	20-100
Limos saturadas con agua salada	5.-15
Arcillas no saturadas	20-40
Arcillas saturadas	5.-20
Arcillas saturadas con agua salada	1.-10
Andasoles secos	1000-2500
Andasoles no saturados	300-100
Andasoles saturados	30-50

Se resalta también que si bien algunas de las tomografías realizadas de forma perpendicular al cauce del Tonusco, como las TRE 3B, 4B y 5B, sólo alcanzaron los 4 m de profundidad de investigación (para mayor información ver Anexo 5 digital), la medición del nivel piezométrico en aljibes ayudó a evidenciar que esos niveles piezométricos se encontraban a profundidades relativamente bajas, en la margen izquierda del río Tonusco variando desde 483.3 m.s.n.m. cerca a la desembocadura en el río Cauca hasta aproximadamente 526.4 m.s.n.m. en la terraza donde se realizó la TRE 5-5B (Figura 8) cerca a la cabecera municipal de Santa Fe de Antioquia. En la margen derecha, el nivel piezométrico era mayor, pues los aljibes presentes se encontraban más distales (entre 100 y 200 m de distancia) al cauce del río, pero en compilación con las TRE realizadas, la información secundaria revisada (UNAL-Corantioquia, 2004) y el mapa de isopiezas elaborado, se pudo establecer que el nivel piezométrico se encontraban a una profundidad aproximada de 547. 6 m.s.n.m.

En la Figura 40 se presenta el mapa de modelos de inversión interpretados a partir de las TRE tipo realizadas perpendiculares al cacuce del río Tonusco. Durante el proceso de interpretación se pudo establecer que las tomografías tendidas perpendicularmente al cacuce del río Tonusco otorgaron una primera, y muy somera, aproximación de cómo se

manifiesta la interacción entre el río y el acuífero, pues de los perfiles geoeléctricos obtenidos se pudo identificar que, al superar la barrera aproximada de los 3 metros de profundidad, los materiales de litologías más gruesas como arenas y gravas se manifestaban con un alto contenido de saturación, evidenciado en las bajas resistividades que estos presentaban.

Como ejemplo se tiene que, en la TRE 5B (Figura 40Error! Reference source not found.), se puede observar como, a partir de aproximadamente 2 metros de profundidad, sobre un material que se identificó como arenas y gravas, hay una notable variación en sus valores de resistividad. Ésta se marca como una mancha de color café (valores del orden de 162 ohm.m) sobre el costado W del perfil (recordar que son datos extrapolados, pero que otorgaron una idea, además de que la geología levantada en la zona ayuda a soportar esta declaración), que genera contraste con los colores rojo y anaranjado (valores del orden de 283 ohm.m) sobre la misma profundidad, siendo dichos valores de resistividad correspondientes al mismo material (arenas y gravas). Estos contrastes en los valores de resistividad para un mismo material se deben a las diferencias de saturación de los materiales geológicos, producto de la interacción que hay entre estos y el acuífero (Figura 39).

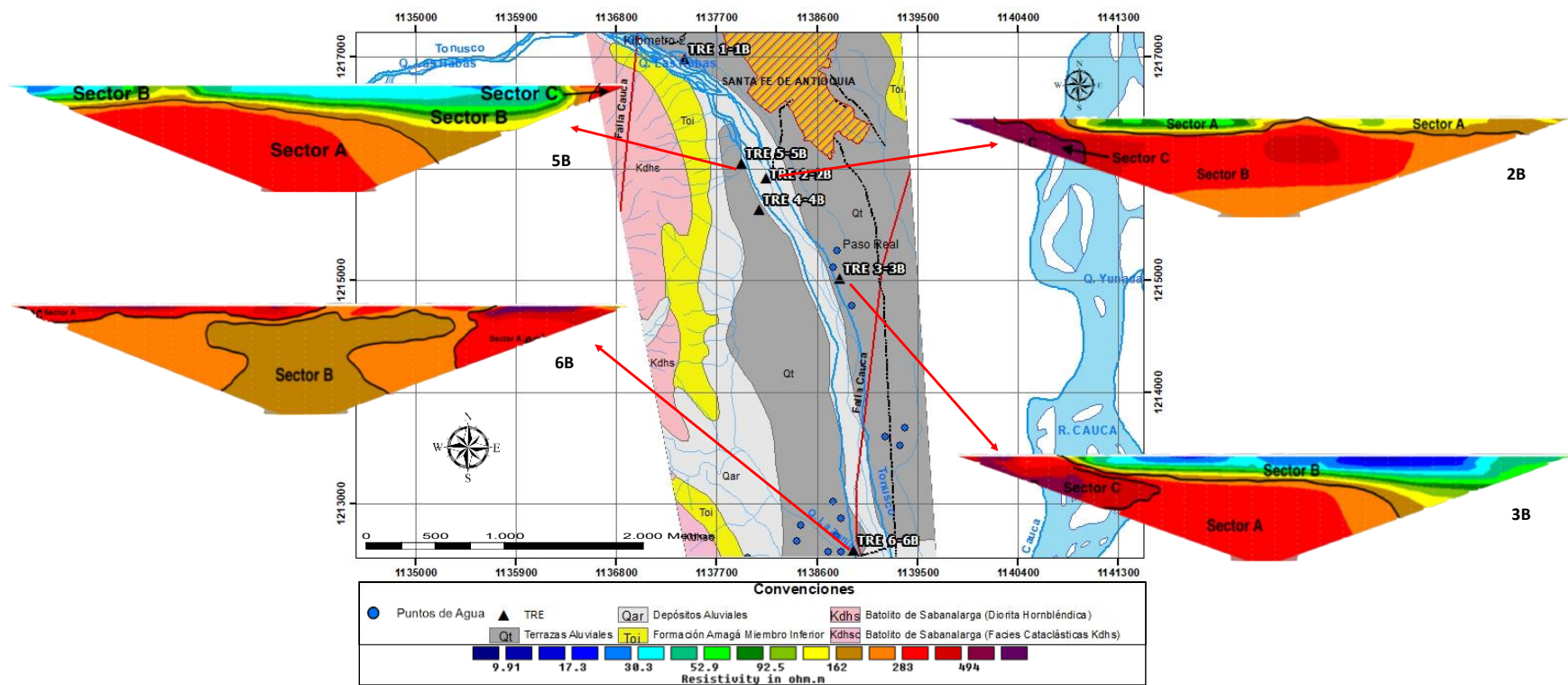


**Figura 39.** Perfil geoeléctrico de la TRE 5B.

Adicionalmente, se aclara nuevamente el hecho de que la cantidad de datos con que se realizaron los mapas de isopiezas no son una muestra representativa, se pudo concluir, a modo de instruir al lector sobre el funcionamiento de estos mapas, que estos otorgaron una idea inicial de cómo se presenta la interacción río-acuífero en términos de pérdida o ganancia de flujo en el río Tonusco, pues se pudo determinar que el río presenta un comportamiento perdedor, hacia la cabecera municipal, aguas arriba de la desembocadura

en el río Cauca. Esto se puede observar en el mapa (ver Figura 34), el cual muestra que las isopiezas apuntan en dirección hacia abajo donde se cruzan/cortan con la corriente del río Tonusco, así como por la gran altura del nivel piezométrico en dicho tramo (526 a 556 m.s.n.m.). El tramo más cercano a la desembocadura en el río Cauca, por el contrario, presenta un comportamiento ganador, evidenciado por la baja altitud del nivel piezométrico (470 a 500 m.s.n.m.) y por que las isopiezas apuntan en dirección hacia arriba donde se cruzan con la corriente del Tonusco.

Ahora, teniendo en cuenta el parámetro de la conductancia hidráulica se establece que la variada litología que presentan las terrazas sobre las que se hizo el estudio no permite establecer las zonas de mayor conductancia, pues estas no presentan un patrón de sedimentación que permita inferirlo. Es posible que por la alta cantidad de materiales gruesos (principalmente gravas) que se presentaban en la zona donde se realizaron las TRE 6 y B, (sobre la desembocadura del río Tonusco en el Cauca) la conductancia en esa zona sea alta, dado que el material es grueso y, por tanto, más poroso, lo que facilita el flujo y almacenamiento de agua a través de este, y permitiendo inferir un comportamiento ganador en dicha zona.



**Figura 40.** Mapa de modelos de inversión final (perfiles geoelectricos) interpretados en las diferentes zonas enmarcadas dentro del área de interés.

Longitud/Profundidad investigación (m): TRE 2B: 52 /8.25; TRE 3B: 28/4.13; TRE 5B: 29/4.13; TRE 6B: 47/8.25.

Este comportamiento variable que presenta el río en términos de ganancia o pérdida de flujo se debe a la alta variabilidad granulométrica en el lecho del río, lo que lo hace muy dinámico, siendo éste uno de los factores que generó dificultad en la prospección geofísica (con SEV) del trabajo elaborado por Corantioquia-UNAL (2004).

Teniendo en cuenta lo previamente mencionado se pudo establecer, de manera inicial y aproximada, y con apoyo de la geología de campo y de la medición de niveles piezométricos, así como la elaboración de los mapas de isopiezas, que las zonas ubicadas sobre la margen izquierda, principalmente hacia el sur presentan un mayor grado de interacción que las de la margen derecha. Esto pudo deducirse debido a que las tomografías realizadas sobre la margen izquierda exhibieron rangos de resistividades correspondientes a materiales gruesos saturados a menores profundidades (desde 1.5 y 4 m) que los resultados exhibidos en las tomografías realizadas sobre la margen derecha (desde 3 y 6 m aproximadamente) del río Tonusco, a pesar de que las terrazas tenían alturas similares. Esto se pudo corroborar por la mayor cantidad de puntos de agua presentes y por las profundidades (menores, variando entre 4 y 15 m) a las que se encontraba el nivel freático y piezométrico (470 a 500 m.s.n.m.) en tal margen. Si bien los contrastes de resistividad de los materiales saturados interpretados en las tomografías realizadas sobre la margen derecha son notorios, la profundidad a la que se encontraron tales contrastes era mayor, coincidiendo con la mayor profundidad a la que se encontraban los niveles freáticos medidos en esa zona (entre 15 y 25 m). Se hace determinante aclarar que las TRE en su mayoría alcanzaron profundidades de 8,25 m en las cuales se observaron zonas saturadas, y los aljibes medidos tienen una profundidad promedio de 10 m, esto se explica por el hecho de que ambas mediciones se hicieron en fechas diferentes, más precisamente el 23 de febrero la realización de las TRE y el 27 de marzo la medición de los aljibes. Este rango de tiempo pudo hacer que las profundidades a las que se encontraba el nivel piezométrico variaran.

Lo plasmado anteriormente sirve como punto de partida al entendimiento, de forma aproximada, de la interacción río-acuífero, lo cual es importante para llevar a cabo el establecimiento de nuevos y mejorados Planes de Manejo Ambiental de sistemas de Acuífero (PMAA) que, a largo plazo, permiten solucionar las diferentes problemáticas (incluyendo el desabastecimiento) presentes en torno al recurso hídrico. Esto tiene como finalidad buscar la posibilidad de lograr un manejo sostenible del recurso en la región.



Finalmente, cabe mencionar que con el método indirecto de Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE) es posible llegar a una aproximación al entendimiento de la interacción río-acuífero mediante la determinación de estos materiales geológicos saturados, la profundidad a la que se encuentran y la propiedad de la conductancia hidráulica, aunque para llegar a eso se necesita del apoyo de herramientas como la geología de campo, medición de niveles freáticos, entre otras. Así mismo, para lograr la obtención de resultados más sólidos y que permitan entender más precisamente esta interacción y su nivel o clasificación, se hace necesario la implementación de una metodología que implique otras herramientas como modelamiento numérico y perforaciones de pozos, así como la realización de múltiples mediciones en diferentes periodos hidrológicos, que el alcance y objetivo de este proyecto no permitieron. También, se destaca que se hubiera logrado una mayor claridad en los resultados si se hubiera hecho uso de la Tomografía 4D, dado que permite observar, caracterizar y evaluar los aspectos dinámicos del río interactuando con el acuífero a través del tiempo (López, 2006).

## 8. Conclusiones

- El presente trabajo pretende contribuir al entendimiento de la interacción acuífero-río en el sector Tonusco del sistema acuífero de Santa Fe de Antioquia mediante la realización de 10 TRE (y la utilización de 2 TRE obtenidas en la materia de Geología de Campo 2 en el semestre 2017\_2) en la llanura aluvial del río Tonusco, cerca de la desembocadura en el río Cauca. Como forma de apoyar, calibrar los datos y orientar la interpretación de los resultados de la geoeléctrica, se hizo un levantamiento geológico previo y se realizó una medición de niveles piezométricos en el área de interés.
- Este método geofísico se seleccionó debido al hecho de que es ampliamente utilizado para la exploración de aguas subterráneas, genera resultados confiables (siempre que se realice una buena obtención de datos geológicos), no es invasivo (a diferencia de las perforaciones) y no representa altos costos.
- El arreglo geométrico utilizado fue Wenner-Schlumberger, pues incorpora las ventajas de ambos arreglos, permite obtener amplias profundidades de investigación y, adicionalmente, genera una buena cobertura de datos tanto en la vertical como en la lateral, lo cual facilita obtener buenos contrastes entre las resistividades y así determinar las variaciones de resistividad en el subsuelo debido a la saturación de los materiales geológicos, es decir, que permite apreciar, de forma inicial y aproximada, la interacción entre el río y el acuífero.
- En el proceso de interpretación de las TRE se encontró, en términos generales, que las terrazas del área de estudio sobre las cuales se realizaron dichas TRE (las cuales presentaban gradación intercalada y caótica, debido a la dinámica de río trenzado que el Tonusco), exhibieron contrastes de resistividades que permitieron determinar, junto con la ayuda del trabajo de geología de campo, las similitudes litológicas que presentaban, manifestando entre limos, arenas y gravas, con predominancia de las dos últimas y con variaciones en la lectura resistiva, debido a la saturación de estos, a diferentes profundidades.
- Se pudo definir que la realización combinada de TRE tanto de forma paralela como perpendicular al cauce del río permite apreciar cómo varía la resistividad de los materiales geológicos debido a su saturación por estar en contacto de forma directa con

el recurso hídrico. Además, se pudo establecer que la saturación de materiales geológicos, así como la profundidad a la que se manifiestan, interpretados a partir de métodos geoelectricos, permiten inferir qué zonas presentan, de forma aproximada, un mayor grado de interacción entre el río y el acuífero.

- A partir del mapa de isopiezas, se definió que el río Tonusco presenta un comportamiento perdedor en el tramo más distal de su desembocadura en el río Cauca y un comportamiento ganador en el tramo más cercano a la desembocadura en el Cauca, esto debido a la variabilidad de la granulometría en su lecho, así como por la presencia de algunos afluentes (quebradas) que surten al río más en un tramo que en otro.
- De la interpretación de los perfiles geoelectricos y el mapa de isopiezas, con la finalidad de determinar cuales zonas sobre las márgenes, derecha e izquierda, del río Tonusco presentan mayor interacción río-acuífero, se determinó que las zonas ubicadas sobre las terrazas de la margen izquierda del río Tonusco presentan un mayor grado de interacción que las de la margen derecha, pues las interpretaciones de las tomografías realizadas sobre la margen izquierda exhibieron rangos de resistividades correspondientes a materiales gruesos saturados a menores profundidades (desde 1.5 y 4 m) que los resultados exhibidos en las tomografías realizadas sobre la margen derecha (desde 3 y 6 m aproximadamente) a pesar de que las terrazas tenían alturas similares. Esto se pudo corroborar por la mayor cantidad de puntos de agua presentes y por las profundidades (menores, variando entre 4 y 15 m) a las que se encontraba el nivel freático en tal margen. De forma adicional, teniendo en cuenta el parámetro de conductancia hidráulica, es posible afirmar que por la alta cantidad de materiales gruesos (principalmente gravas) que se presentaban en la zona donde se realizaron las TRE 6 y B, (sobre la desembocadura del río Tonusco en el Cauca) la conductancia en esa zona sea alta, dado que el material es grueso y, por tanto, más poroso, lo que facilita el flujo y almacenamiento de agua a través de este, y permitiendo inferir un comportamiento ganador en dicha zona.
- En aras de establecer el alcance del método de la TRE para este tópico, se destaca que este método geoelectrico implementado presenta la limitación de no poder estimar de forma directa el tipo de interacción que el río y el sistema acuífero presenta, pues para esto se hace necesario la implementación de mapas de direcciones de flujo, entre otras

herramientas. Para esto, se determinó que los resultados obtenidos mediante este método son sólo una aproximación de los valores observados en campo y por lo tanto no representan una estimación precisa y definitiva de la realidad.

- La falta de actualizaciones sobre la geología en el acuífero de Santa Fe de Antioquia dificulta la elaboración de un modelo hidrogeológico conceptual más completo, lo que a su vez genera carencia de precisión sobre este, además de sesgos en el entendimiento de la interacción río-acuífero, que impiden un óptimo ordenamiento territorial para lograr un manejo sostenible del acuífero en la zona.

## **9. Recomendaciones**

- Optimizar las prácticas de manejo del equipo en campo para así evitar daños que retrasan la realización de los diferentes proyectos de grado que requieran del uso de este equipo.
- Hacer uso de una tomografía 4D para llegar a obtener resultados que permitan determinar la interacción río-acuífero de forma precisa.
- Incorporar los resultados adquiridos a futuras campañas que se realicen en diversas estaciones para así medir la interacción río-acuífero a través del tiempo, teniendo en cuenta los diferentes periodos hidrológicos.
- Para trabajos posteriores con el objetivo de obtener resultados mas precisos y llegar a entender cómo es el tipo de interacción que se presenta entre el río y el acuífero se propone hacer uso de herramientas adicionales como modelamiento numérico, perforaciones de nuevos pozos, medición en el tiempo de niveles piezométricos, determinación de recarga por precipitación y mapas de direcciones de flujo.

## 10. Bibliografía

- Alfonso, M. (1997). Medida de la resistividad eléctrica del subsuelo. *Geoelectrica* 2, 1–24.
- [ALH] ALH Geofísica. (2007). Observacion en el tiempo del comportamiento de una pluma (tomografia electrica 4d). Argentina.: ALH Geofísica. Recuperado de <http://www.alhgeofisica.com>.
- Arias, D. E.; Echeverri, O. & Hoyos, F. (2012). Relaciones geoelectricas en la exploracion geotecnica. Universidad Nacional – Sede Medellín, Colombia.
- Bacca, J. M.; Pardo, O. H. & Avila, L. E. V. (2012). Determinacion De La Geometria Del Acuífero De Morrosquillo Y Geologia Detallada Del Acuífero De Tolviejo, Sucre. *Dyna*, 35, 87–101.
- Cardozo, L. M.; Paola, S. & Vargas Pérez, A. (2015). Estudio Geoelectrico a Partir De Método Sev Para La Modelación De Acuíferos En Los Sectores De Iza, Cuítiva Y Firavitoba-Departamento De Boyacá. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, 102.
- [Corantioquia-UNAL] Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia-Universidad Nacional de Colombia. (2004). Evaluación del potencial Acuífero en los municipios de Santa Fe de Antioquia, San Jerónimo, Sopetrán, Olaya y Liborina. Medellín, Antioquia, 331 p.
- [Corantioquia-SHI] Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia-Servicios Hidrogeológicos Integrales. (2015). Diagnóstico para la formulación del plan de manejo ambiental del sistema acuífero del Occidente Antioqueño en la territorial Hevéxicos. Corantioquia, 292–293, Medellín, Antioquia.
- [Corantioquia-SHI] Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia-Servicios Hidrológicos Integrales. (2017). Formulación del plan de manejo ambiental del sistema acuífero del occidente antioqueño 2017. Medellín, Antioquia.

- Estrada, L. (2013). Prospección geoelectrica. Facultad De Ciencias Exactas Y Tecnología Departamento De Geodesia Y Topografía, Universidad Nacional de Tucuman, Argentina.
- Hiscock, K.M., and Grischek, T., 2002. Attenuation of groundwater pollution by bank filtration. *Journal of Hydrology*, 266 (3-4): 139 – 144.
- [IDEAM] Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales (2010). Estudio Nacional del Agua 2010. Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales. Bogotá D.C. 420 p.
- [IDEAM] Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales (2015). Estudio Nacional del Agua 2014. Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales. Bogotá D.C. 496 p.
- [INGEOMINAS] Instituto Colombiano de Geología y Minería. (1984). Memoria explicativa de la geología y geoquímica de las planchas 130 (Santa Fe de Antioquia) y 146 (Medellín Occidental) en escala 1:100.000. Bogotá, D.C. 496 p. 398.
- Loke, D. M. (1999). Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies. *Cangkat Minden Lorong*, 1999, 63.
- [Minambiente] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2019). Diagnóstico de las Aguas Subterráneas. Bogotá D.C.
- Oldenburg, D. W. (1994). The pole-pole 3-D DC-resistivity inverse problem: a conjugate-gradient approach, 187–194.
- Salas & Rosado (2018). Caracterización geoelectrica de los perfiles de meteorización de las rocas cristalinas en la zona de recarga y tránsito del acuífero de Santa Fe de Antioquia en el municipio de Sopetrón, plancha 130-III-B4. Universidad EAFIT, Medellín, Colombia.

Sophocleous, M. (2002). Interactions between groundwater and surface water: the state of the science. University of Kansas, U.S.A., 67.

[UNAL] Universidad Nacional de Colombia. (2000). Investigacion en aguas subterraneas: Region Valles de San Nicolas. Medellín, Antioquia.

[USGS] United States Geological Survey. (2016). USGS Grounwater information. U.S. Department of he Interior, U.S.A.

Winter, T. C.; Harvey, J. W.; Frankle, O. & Alley, W. M. (1998). Ground Water and Surface Water A Single Resource. U.S. Geological Survey circular 1139. Denver, Colorado.

## **11. Anexos**

### **Anexo 1**

Informe de Primera Salida de Campo Proyecto de rado (Carpeta Anexos/Documento Word).

### **Anexo 2**

Informe de Segunda Salida de Campo Proyecto de Grado (Carpeta Anexos/Documento Word).

### **Anexo 3**

Mapas Proyecto de Grado. Se encuentran: Mapa Geológico, Mapa Geomorfológico, Mapa Topográfico, Mapa de Área de estudio, Mapa de Localización de TRE, Mapa Isopiezas. (Carpeta Anexos/Mapas Proyecto de Grado).

### **Anexo 4**

Datos Crudos TRE Proyecto de Grado (Carpeta Anexos/Datos Crudos TRE Proyecto de Grado/archivos en formato .DAT, formato RES2DINV y formato .TXT-aportados por software Geotest).

### **Anexo 5**

Interpretación de TRE (Carpeta Anexos/Documento en Word).